

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3	Глава 5. Конструирование РЭА третьего поколения . . . . .	70
Введение . . . . .	5	§ 5.1. Элементная база РЭА третьего поколения . . . . .	70
Глава 1. Факторы, определяющие конструкцию РЭА . . . . .	7	§ 5.2. Печатные платы, гибкие шлейфы и кабели . . . . .	78
§ 1.1. Классификация и области применения РЭА . . . . .	7	§ 5.3. Компоновка РЭА третьего поколения . . . . .	93
§ 1.2. Условия эксплуатации РЭА . . . . .	12	§ 5.4. Компоновочные схемы РЭА . . . . .	105
§ 1.3. Ремонтпригодность и взаимозаменяемость при эксплуатации РЭА . . . . .	18	§ 5.5. Внешняя компоновка РЭА . . . . .	111
Глава 2. Конструкторская документация . . . . .	23	Глава 6. Конструирование РЭА четвертого поколения . . . . .	114
§ 2.1. Конструкторские документы и их классификация . . . . .	23	§ 6.1. Основные направления микроминиатюризации и задачи микроэлектроники . . . . .	114
§ 2.2. Стадии разработки конструкторской документации . . . . .	27	§ 6.2. Элементная база РЭА четвертого поколения . . . . .	116
§ 2.3. Организация работы с конструкторской документацией на предприятии . . . . .	30	§ 6.3. Компоновка РЭА четвертого поколения . . . . .	133
Глава 3. Проектирование РЭА с учетом требований надежности . . . . .	34	Глава 7. Тенденции развития микроэлектроники . . . . .	143
§ 3.1. Основные определения теории надежности . . . . .	34	§ 7.1. ИМС большой и сверхбольшой степени интеграции . . . . .	143
§ 3.2. Количественные характеристики теории надежности . . . . .	37	§ 7.2. Основные направления развития функциональной микроэлектроники . . . . .	147
§ 3.3. Расчеты надежности при проектировании РЭА . . . . .	42	Глава 8. Использование машинного проектирования при конструировании изделий РЭА . . . . .	154
§ 3.4. Общие и специальные методы повышения надежности . . . . .	46	§ 8.1. Общие вопросы автоматизации проектирования РЭА . . . . .	154
§ 3.5. Особенности обеспечения надежности микроэлектронной аппаратуры . . . . .	56	§ 8.2. Техническое и программное обеспечение систем автоматизированного проектирования . . . . .	157
Глава 4. Компоновка РЭА . . . . .	58	§ 8.3. Построение систем технического проектирования РЭА . . . . .	162
§ 4.1. Основные принципы компоновки . . . . .	58	§ 8.4. Конструкторская и технологическая документация при автоматизированном проектировании . . . . .	172
§ 4.2. Внутренняя компоновка изделий . . . . .	59	§ 8.5. Технические средства получения конструкторской документации . . . . .	173
§ 4.3. Конструктивная иерархия и основные направления конструирования РЭА . . . . .	62	Заключение . . . . .	175
§ 4.4. Критерии качества компоновки и конструкции . . . . .	68	Литература . . . . .	175

ББК 32.844  
А42  
УДК 621.396.6

Рецензенты: В. В. Масленников — преподаватель Московского авиационного техникума, Ф. А. Ломако — инженер

**Аксенова И. К., Мельников А. А.**  
А42 **Основы конструирования радиоэлектронных приборов: Учеб. для средн. спец. уч. зав. — М.: Высш. шк., 1986. — 176 с., ил.**

В книге рассмотрены основные требования к радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) при конструировании в зависимости от применения, условий эксплуатации, надежности и т. д.; изложены вопросы проектирования, компоновки и микроминиатюризации РЭА, тенденции развития микроэлектроники и прогрессивных направлений конструирования РЭА, а также машинного проектирования при конструировании.

А  $\frac{2402020000-380}{001(01)-86}$  166-86

ББК 32.844  
6Ф2.08

*Учебное издание*

**Инна Константиновна Аксенова**  
**Алексей Алексеевич Мельников**

## **ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ**

Зав. редакцией **Л. А. Романова**. Редактор **Е. А. Орехова**. Младший редактор **И. А. Исаева**. Художественный редактор **Т. М. Скворцова**. Художник **Г. В. Куликов**. Технический редактор **Ю. А. Хорева**. Корректор **Р. К. Косинова**

ИБ № 5413

Изд. № ЭР-412. Сдано в набор 17.02.86. Подп. в печать 08.07.86. Т-07576. Формат 84×108<sup>1</sup>/<sub>2</sub>. Бум. кн.-журн. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Объем 9,24 усл. печ. л. 9,66 усл. кр.-отт. 9,74 уч. изд. л. Тираж 40 000 экз. Зак. № 1398. Цена 30 коп. Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Московская типография № 4 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли 129041, Москва, Б. Переяславская, 46

© Издательство «Высшая школа», 1986

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В решении ключевой политической и хозяйственной задачи — всемерного ускорения научно-технического прогресса — особое значение, как отмечается в Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года, имеют разработки и широкое применение электронно-вычислительных машин всех классов, изготовление высоконадежных систем промышленной автоматики на базе электроники прежде всего для управления технологическими процессами, использование элементной базы повышенной надежности и быстродействия, сверхбольших интегральных схем, лазерной и волоконно-оптической техники, развитие квантовой электроники, радиофизики, оптики и микроэлектроники.

Развитие микроэлектроники и использование в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) новой элементной базы во многом изменило процесс конструирования, который стал важнейшим этапом разработки современной РЭА.

Основные задачи, которые в настоящее время должен решать конструктор, — микроминиатюризация, высокая надежность и высокое качество конструкции и конструкторской документации. Успешному решению этих задач во многом способствует использование при разработке РЭА систем автоматизированного проектирования (САПР), которые, кроме того, повышают производительность труда конструктора и снижают стоимость разработки.

Учебник написан в соответствии с программой курса «Основы конструирования РЭА с применением САПР» и предусматривает изучение наиболее важных вопросов в конструировании современной РЭА.

Авторы благодарны В. В. Масленникову и Ф. А. Ломако за полезные замечания при рецензировании рукописи.

Предисловие, введение, гл. 1, 2, 3, 8, § 4.1, 4.3, 5.4, 5.5 и 7.2 написаны И. К. Аксеновой; гл. 6, § 4.2, 5.1, 5.2, 5.3 и 7.1 и заключение — А. А. Мельниковым.

Пожелания и замечания по книге просим направлять по адресу: 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».

*Авторы*

## ВВЕДЕНИЕ

С развитием научно-технического прогресса возрастает сложность радиоэлектронной аппаратуры, перед конструкторами встают новые задачи. От конструкции РЭА в значительной степени зависят качество и эффективность использования аппаратуры, ее надежность и функциональные возможности, стоимость производства и эксплуатации.

Конструирование — это процесс выбора и отражения в технических документах структуры, размеров, формы, материалов и внутренних связей проектируемого устройства.

Конечным результатом процесса конструирования является комплект конструкторской документации, отображающей всю совокупность требований к разрабатываемому изделию и обеспечивающей выполнение этих требований после изготовления изделий в производстве.

При конструировании изделий РЭА кроме пространственных и механических взаимосвязей необходимо учитывать сложные электрические связи, ограничивать электромагнитные и тепловые поля, учитывать возможности искажения полезных сигналов и появления помех.

Конструкция первых радиоэлектронных устройств не отличалась от конструкции аппаратуры проводной связи. Основой конструкции был деревянный ящик, на стенках которого размещались необходимые детали, а электрическое соединение этих элементов выполнялось изолированным проводом. В конце 20-х годов появилось металлическое шасси, которое кроме назначения быть основой конструкции могло выполнять роль экрана, чтобы уменьшить связь по электромагнитному полю. В это же время была заимствована из телефонии идея конструирования аппаратуры в вертикальной стойке, что требовало разделения аппаратуры на блоки.

В конце 30-х годов начинается применение радиоаппаратуры в полевых условиях, на подвижных объектах (самолеты, танки, автомашины), что поставило перед конструкторами сложные задачи защиты аппаратуры от

климатических и механических воздействий и привело к разработке герметичных корпусов и амортизаторов.

Расширение области применения РЭА и постоянное функциональное усложнение радиоаппаратуры потребовали снижения трудоемкости в производстве, повышения производительности труда, применения средств механизации и автоматизации. Это привело к внедрению полупроводниковых приборов, печатного монтажа, к разработке конструкций на основе печатных плат, полосковых, а затем микрополосковых линий, интегральной микроэлектроники, появлению функциональной микроэлектроники.

Переход на новую элементную базу, рост степени ее интеграции, когда постепенно начинает исчезать грань между элементной базой и устройством, обусловили новые методы конструирования, получившие название комплексной микроминиатюризации. Главной целью комплексной микроминиатюризации является создание высоконадежной РЭА с минимальными габаритами и массой, с наименьшей потребляемой мощностью и себестоимостью. Важным вопросом при этом является сокращение сроков проектирования и изготовления аппаратуры. Комплексная микроминиатюризация требует целенаправленной работы различных специалистов, но конструктор РЭА должен занимать в этой работе определяющее положение.

## ГЛАВА 1

### ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ КОНСТРУКЦИЮ РЭА

#### § 1.1. Классификация и области применения РЭА

Конструкция РЭА зависит от большого количества факторов, основными из которых являются: функциональное назначение аппаратуры, объект установки, условия эксплуатации, эксплуатационные требования, производственно-технологические требования, экономические показатели. При разработке конструкции, полностью удовлетворяющей заранее поставленным требованиям, и в процессе конструирования необходимо учитывать эти факторы. Однако современная РЭА настолько многообразна, что требуется определенная специализация при ее конструировании.

Прежде всего необходима классификация РЭА, которая четко отражала бы конструктивные особенности аппаратуры.

С конструкторской точки зрения наиболее удобной является классификация по назначению, тактике использования и объекту установки. Классообразующим признаком категории конструкций РЭА является одна из трех глобальных зон использования: воздушное (космическое) пространство, океан и суша. Поэтому всю РЭА классифицируют по трем категориям: бортовая, морская и наземная аппаратура. Внутри каждой категории классификация проводится по объекту установки, т. е. в каждой категории различают группы аппаратуры, а в каждой группе — подгруппы по условиям эксплуатации. При конструировании аппаратуры пользуются классификацией, приведенной в табл. 1.1.

Области использования РЭА удобно рассматривать, пользуясь приведенной классификацией.

Бортовая РЭА — это аппаратура, устанавливаемая на летательных объектах. Основными задачами при конструировании такой РЭА следует считать: умень-

Таблица 1.1

Категория аппаратуры	Группа аппаратуры	Количество подгрупп по условиям эксплуатации
Бортовая	Самолетная (вертолетная) Ракетная Космическая	18
Морская	Судовая (корабельная) Буйковая	7
Наземная	Возная Носная Переносная Бытовая Стационарная	14

шение массы и габаритов в связи с ограниченными возможностями бортовой РЭА по данным показателям; необходимость работы РЭА в условиях пониженного атмосферного давления, что требует использования специальных средств защиты; необходимость защиты РЭА от сложных механических воздействий.

Каждая группа бортовой РЭА (см. табл. 1.1) имеет свои особенности, обуславливающие дополнительные задачи для конструктора.

*Самолетная и вертолетная РЭА* характеризуется относительной кратковременностью непрерывной работы, измеряемой часами. В остальное время РЭА находится под контролем и обслуживанием персонала ремонтной базы. Аппаратура подвергается периодическому осмотру и контролю, а перед каждым вылетом производится предполетная проверка. Следовательно, конструкция должна обеспечивать свободный доступ ко всем частям аппаратуры для уменьшения времени на поиск неисправности. Отсюда вытекает требование высокой ремонтпригодности конструкции.

Температура корпуса самолета может изменяться в широких пределах. Летом на аэродромах в южных районах корпус нагревается до 50 °С. При взлете и подъеме на высоту температура резко падает, достигая на высоте 10 км — 56 °С. На сверхзвуковых самолетах при полете в плотных слоях атмосферы корпус самолета может нагреваться до 150 °С. В результате РЭА, расположенная вне гермоотсека, может испытывать тепловой удар.

Группа самолетной и вертолетной РЭА подвергается также значительным вибрационным, ударным и линейным перегрузкам. Величины перегрузок зависят от класса самолета или вертолета и в каждом конкретном случае имеется свой диапазон вибраций. Вибрации на нижних частотах диапазона возникают во время движения самолета по взлетно-посадочной полосе, а на верхних определяются работой двигателя. На взлете и посадке образуются ударные перегрузки с хаотическим чередованием ударов. При любом изменении скорости возникают линейные перегрузки. Такой сложный комплекс механических воздействий требует применения специальных средств защиты.

На борту самолета работает большое количество РЭА различного назначения. Важное требование к самолетной РЭА — автоматическая работа аппаратуры. Обработка результатов и управление аппаратурой должны производиться автоматически, а результаты работы аппаратуры выдаваться в виде, удобном для быстрого восприятия: отклонение стрелки, зажигание сигнала, совмещение визиров и т. д. Однако в связи с ограниченностью места в кабине экипажа аппаратура выносится в различные отсеки, где есть к ней свободный доступ, а индикаторы и органы управления размещаются в кабине. Поэтому характерной особенностью конструкций самолетной или вертолетной РЭА является наличие коммуникаций дистанционного управления, по которым передаются управляющие напряжения для перестройки приемников, передатчиков, изменения режимов работы радиолокационных станций и т. д.

К космической и ракетной РЭА предъявляются особые требования, основными из которых являются: ограниченность массы и габаритов в связи с требованиями минимального стартового веса ракеты-носителя; чрезвычайно высокая безотказность в работе; ремонтпригодность в предстартовый период; совместное действие вибрационных и линейных нагрузок во время старта.

Условия работы в космическом корабле имеют много общего с условиями работы в самолете, но длительность полета космического корабля требует еще более высокой безотказности работы аппаратуры во время полета.

К космической РЭА относится аппаратура искусственных спутников Земли, основная особенность которой — большая продолжительность эксплуатации (годы) без обслуживания. Спутник представляет собой контей-

нер, заполненный РЭА и физическими приборами, которые являются датчиками для РЭА. Источниками питания служат химические источники, работающие совместно с солнечными батареями. Особенность спутниковой РЭА — работа в условиях атмосферы с постоянным газовым составом низкой влажности или в вакууме, опасность воздействия радиации, воздействие циклически изменяющихся температур, отсутствие механических нагрузок во время работы аппаратуры.

Для *ракетной* РЭА должна быть обеспечена кратковременность предстартовой проверки и ремонтпригодность в предстартовый период, для чего необходимо иметь возможность измерять режимы работы и производить подстройку непосредственно перед пуском ракеты. Это требует предусмотреть в конструкции дистанционное управление с выводом контрольных точек в места, удобные для доступа. Дополнительными отличительными чертами ракетной РЭА являются: разовость использования; работа в условиях быстрого возрастания окружающей температуры на обшивке ракеты (до нескольких сотен градусов); длительная сохраняемость при многолетнем хранении; большие ударные нагрузки.

*Морская* РЭА характеризуется общими следующими условиями: морская среда, как постоянно действующий фактор, требует разработки аппаратуры в тропическом исполнении, предусматривающем коррозионную стойкость и плесенестойкость, влагозащищенность и брызгозащищенность, ударные перегрузки и линейные ускорения.

Значительные ударные перегрузки характерны для любой морской РЭА и возникают при ударах волн, а линейные перегрузки возникают при качке.

*Судовая (корабельная)* РЭА имеет следующие особенности: необходимость учета ограниченности размеров люков и проходов на судне; высокий уровень типизации конструкций в целях упрощения материально-технического снабжения судов запасными узлами; возможность ремонта РЭА на месте установки без захода на ремонтную базу при минимальном количестве обслуживающего персонала и ограниченных контрольно-измерительных и ремонтных средствах.

*Буйковая* РЭА служит в основном для навигационных целей. К ней также относятся переносные радиостанции спасательных средств. Особенности буйковой РЭА являются: большая продолжительность необслужи-

ваемой эксплуатации; работа в морской воде в плавающем или погруженном состоянии; воздействие сильных ударов, связанных с волнением моря и способом постановки буя путем сбрасывания.

Температурные условия для буйковой РЭА считаются хорошими благодаря интенсивному теплоотводу от корпуса.

*Наземная* РЭА наиболее обширна и разнообразна. Общей задачей при конструировании наземной РЭА является защита от пыли, вибраций и ударов в условиях нормального атмосферного давления.

К *возимой* РЭА относятся мобильные связные и радиолокационные станции, диспетчерские станции строительных, сельскохозяйственных и транспортных организаций, передвижные телевизионные станции и т. п. Наиболее крупной разновидностью возимой РЭА являются мобильные радиостанции, размещаемые в кузовах автомашин. Для конструкции возимой РЭА прежде всего необходимо предусмотреть возможность погрузки и разгрузки частей РЭА двумя людьми. Значительная часть возимой РЭА должна работать во время движения.

К *носимой* аппаратуре относятся станции ближней связи, миноискатели, портативные радиопеленгаторы, отдельные виды медицинской РЭА и т. д. Носимая РЭА используется и обслуживается одним человеком-оператором. Основными требованиями являются защита от случайных ударов и ограничения по массе аппаратуры: аппаратура, носимая оператором за плечами, должна иметь массу не более 13 кг, а аппаратура карманного типа — не более 1 кг.

*Переносная* РЭА — это лабораторная измерительная и медицинская аппаратура, устанавливаемая на ровную поверхность стола или пола, причем во время переноски с места на место эта аппаратура не должна работать. Она работает в условиях отапливаемых помещений. Конструктор должен предусмотреть возможность переноски аппаратуры силами не более двух человек.

К *бытовой* РЭА относятся радиоприемники, телевизоры, магнитофоны и другая аппаратура, используемая населением. Бытовая РЭА является разновидностью носимой и переносной, однако ее особенности требуют выделения в самостоятельную группу: эстетическое значение внешнего вида; повышенные требования к акустическим данным; приспособленность к эксплуатации совершенно неподготовленным человеком; массовое производ-

ство, долговечность и определяющее значение стоимости.

**Стационарная РЭА** отличается большими габаритами и массой. Характерные особенности: продолжительность эксплуатации и необходимость постепенной модернизации; работа в условиях отапливаемых помещений при нормальных климатических условиях; отсутствие механических перегрузок во время работы; необходимость транспортировки к месту работы с использованием амортизаторов внутри упаковки; возможность хранения в складских условиях климатических зон изготовителя и потребителя.

## § 1.2. Условия эксплуатации РЭА

Конструктивные решения РЭА надо искать не только с позиций основных функций, но и с позиций возможности выполнения этих функций в различных условиях эксплуатации.

Под условиями эксплуатации РЭА понимается совокупность внешних факторов, существенно влияющих на характеристики и работоспособность аппаратуры.

Внешние факторы можно классифицировать на два основных вида: климатические и механические воздействия. *Климатические* воздействия связаны с состоянием атмосферы: ее температурой, влажностью, осадками, давлением, радиацией, загрязненностью пылью, солями, газами, зараженностью микробами и т. д. Причиной *механических* воздействий могут быть: сила тяжести; силы постоянно действующих ускорений; силы инерции, возникающие при изменении скорости движения; силы, связанные с вибрацией от работы двигателей, и др. Для оценки величины каждого воздействующего фактора его сравнивают с нормальными условиями эксплуатации.

Под нормальными условиями понимаются условия работы аппаратуры в закрытых отапливаемых помещениях при отсутствии в воздухе паров, газов, солей, кислот и микроорганизмов при температуре  $20 \pm 5$  °С, относительной влажности 50—80%, атмосферном давлении  $(958 \div 1037) \cdot 10^2$  Па и при отсутствии механических воздействий.

Наибольшее влияние на работу РЭА оказывает температура окружающей среды. Температура изменяется в зависимости от времени года, от географического положения местности, а также от высоты. Максимальная

температура может достигать 55 °С, а пониженные температуры доходят до —60 °С. С подъемом на высоту до 10—30 км температура падает до —(50÷60) °С. На рис. 1.1 показано, что диапазон изменения температуры в околоземной атмосфере может составлять  $\pm 100$  °С. В космосе этот диапазон еще шире.

Изменение температуры окружающей среды влияет на свойства материалов. При повышении температуры механические свойства большинства металлов снижаются и увеличивается их электрическое сопротивление. У меди, например, при повышении температуры до 100 °С сопротивление возрастает на 40%. При понижении температуры у всех материалов понижается пластичность, а при достаточно низких температурах она практически исчезает и материал становится хрупким. В значительной степени зависят от температуры электрические свойства диэлектриков и полупроводников. При повышении температуры у диэлектриков резко падает сопротивление изоляции, растут диэлектрические потери и изменяется диэлектрическая проницаемость.

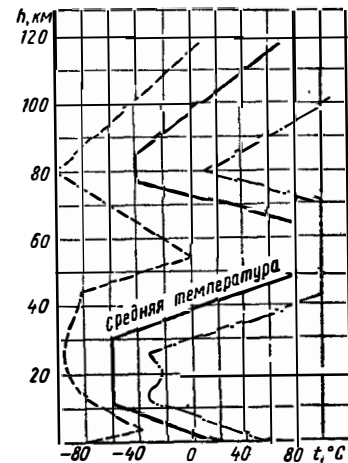


Рис. 1.1. Изменение температуры воздуха в зависимости от высоты

Аппаратура, которая продолжает нормально работать и сохраняет свои параметры в заранее установленных пределах при воздействии повышенных температур, называется *теплоустойчивой*, а при воздействии пониженных температур — *холодоустойчивой*.

В зависимости от географического положения местности может значительно измениться относительная влажность окружающего воздуха. Если нормальная относительная влажность воздуха составляет 50—80%, то в зоне влажных субтропиков и на побережье Ледовитого океана она достигает 85—90%, а в зоне пустынь 5—10%. На показатели влажности влияет температура окружающего воздуха. При температурах ниже нуля влага конденсируется и выпадает в виде инея, поэтому присутствие ее в атмосфере становится незначительным. При температуре воздуха 20—40 °С может иметь место наибольшая влажность, достигшая 100%.

Наиболее опасна относительная влажность порядка 80—90%, так как в этом случае влага находится в воздухе в газообразном состоянии и легче поглощается толщей материалов, проникая сквозь тонкие щели и мелкие поры. При более высокой влажности, в том числе и при 100%, влага поглощается поверхностью материала и меньше проникает в толщу материала. Различные сочетания той или иной относительной влажности, температуры или последовательности в смене этих факторов образуют разнообразие климатических воздействий на РЭА. Увеличение влажности быстро изменяет диэлектрическую проницаемость и электрическую прочность воздуха. Это сказывается на изменении емкости между элементами незащищенной конструкции и может стать причиной пробоев. Особенно заметно это явление при высоких температурах.

Медленнее (в течение нескольких часов) сказывается действие влаги на поверхностное электрическое сопротивление изоляционных материалов. Тончайшая пленка влаги, адсорбированная поверхностью изоляционного материала при 80—100% влажности воздуха, снижает сопротивление изоляции на несколько порядков. Еще медленнее (месяцы, годы) проявляется действие влаги в виде коррозии металлических элементов. Коррозия проявляется в разрушении паяных и сварных швов, что нарушает герметизацию и снижает механическую прочность; может произойти обрыв электромонтажных связей; увеличивается сопротивление контактных пар, что ведет к обгоранию контактов разъемных соединений и к увеличению шумов неразъемных соединений. К воздействию влаги очень чувствительны элементы и структуры интегральных микросхем.

Влияние влаги может привести к отказам в аппаратуре, снижению эффективности и качества РЭА. Лучшим средством защиты конструкции от влаги является герметизация, которая обычно защищает и от других воздействий: пыли, грибка, агрессивных сред, а в отдельных случаях и от определенных механических воздействий.

Аппаратура, которая продолжает нормально работать и сохраняет свои параметры в заранее установленных пределах при воздействии повышенной влажности, называется влагустойчивой.

Устойчивость разработанной РЭА к повышенной влажности проверяют при температуре 40 °С и влажности 98%, так как именно в этих условиях происходит наиболее быстрое окисление большинства металлов и развитие грибковых образований (плесени), а электрические характеристики слоистых диэлектриков, поглощающих воду из воздуха, изменяются на несколько порядков.

На поверхности Земли атмосферное давление принято считать нормальным, но с увеличением высоты оно резко падает. С увеличением высоты воздух становится сильно разреженным, а электрическая прочность очень низкой. При этом на деталях, имеющих острые углы и высокий потенциал, может возникнуть коронный разряд,

может происходить пробой воздушных промежутков, что приводит к выходу аппаратуры из строя. Кроме того, в аппаратуре ухудшается тепловой режим, так как при пониженном давлении уменьшается отвод теплоты от нагреваемых элементов, в результате чего их температура повышается и создаются условия для перегрева аппаратуры.

Для средней климатической полосы наиболее характерно наличие в атмосфере песка, пыли, различных газов. Их влиянию подвергается аппаратура, работающая в зоне пустынь или расположенная на подвижных объектах, передвигающихся по грунтовым дорогам. Обладая высокой твердостью и гигроскопичностью, песок или пыль проникает в трущиеся части механизмов (контакты, зазоры), что приводит или к поломке аппаратуры, или к быстрому износу ее частей, снижает изоляцию токонесущих элементов. Для защиты от пыли и песка в конструкции предусматриваются соответствующие уплотнители.

В районах с влажным тропическим климатом воздух может быть заражен микроорганизмами, вызывающими появление плесени на органических материалах. Особенно интенсивно развивается плесень при повышенных влажности и температуре. Ее наличие ухудшает физико-химические и электрические свойства изоляционных материалов, а длительное воздействие ведет к их полному разрушению.

Коротковолновая часть спектра солнечных лучей (фиолетовая и ультрафиолетовая) — основной фактор фотохимического воздействия. Солнечная радиация способствует окислению или химическому разложению некоторых органических материалов, вызывает растрескивание лакокрасочных покрытий. При достаточно интенсивном воздействии солнечной радиации нарушается работа полупроводниковых приборов (транзисторов, диодов, фоторезисторов, фотодиодов и т. п.), увеличивается проводимость газовых промежутков.

Данные, полученные при эксплуатации и различных испытаниях аппаратуры, показывают, что имеются сильнодействующие климатические факторы и их сочетания: одновременное воздействие повышенной температуры и высокой влажности; переходы через критические точки выпадения росы и замерзания воды; воздействие очень низких и высоких температур; воздействие низких давлений.



В процессе эксплуатации и транспортировки РЭА подвергается механическим воздействиям. В общем случае внешние механические воздействия на конструкции приводят к проявлению сил тяжести и инерции, которые действуют на отдельные части конструкции и вызывают деформацию. В зависимости от места приложения силы и геометрической формы конструкции характер деформации и ее величина могут быть различны. В большинстве случаев механические нагрузки имеют сложный комплексный характер.

Механические воздействия можно характеризовать диапазоном частот колебаний, амплитудой, ускорением и временем действия. Механическим воздействиям подвергаются все категории РЭА, даже стационарная, эксплуатируемая в нормальных условиях, подвергается транспортной тряске при доставке ее после изготовления на место эксплуатации. Но наиболее сложным механическим воздействиям подвергается РЭА, устанавливаемая на подвижных объектах. Такая аппаратура испытывает воздействие вибрации, ударов и линейных ускорений. Механические воздействия возникают, например, при взлете и посадке самолетов, при изменении скорости движения, при движении объекта по дорогам, маневрировании и торможении, стартовых перегрузках и т. д. Параметры механических воздействий зависят от объекта установки РЭА.

Воздействие механических нагрузок приводит к механическим повреждениям, а часто к полному выходу аппаратуры из строя. Например, может произойти разрушение корпуса или отдельных его частей, нарушение герметичности вследствие разрушения паяных, сварных и клеевых швов, обрыв монтажных связей, отслаивание печатных проводников, расслаивание многослойных печатных плат, поломка керамических подложек интегральных микросхем, выход из строя разъемных и неразъемных электрических контактов.

Воздействие вибраций проявляется в основном на тех частях конструкции, которые имеют большую возможность деформироваться. Легко деформируемыми могут оказаться конструкции, имеющие большую массу, но недостаточную жесткость, или сложные сборные конструкции, имеющие зазоры в соединениях. Наиболее опасным явлением при вибрации является механический резонанс частей конструкции, возникновение которого может привести к разрушению не только отдельных эле-

ментов конструкции, но и всей конструкции. Для исключения механического резонанса необходимо, чтобы собственная частота колебаний конструкции находилась вне полосы частот, возникающих при эксплуатации и перелозках. Собственная частота механических колебаний конструкции должна быть больше частоты воздействующих колебаний. Конструкция РЭА должна быть виброустойчивой и вибропрочной.

Под виброустойчивостью понимают способность конструкции нормально работать при воздействии вибраций, а под вибропрочностью — ее способность противостоять разрушающему действию вибраций и нормально работать после длительного воздействия вибраций.

Вибропрочность связана в основном с транспортировочной вибрацией, когда аппаратура выключена, а виброустойчивость с эксплуатационной вибрацией, когда аппаратура включена.

Не менее опасны для РЭА ударные нагрузки, возникающие, например, для морской аппаратуры при сильных ударах штормовой волны о борт корабля, для самолетной — при посадке самолетов. Удар возбуждает быстро спадающие по амплитуде колебания конструкции на резонансной частоте. При высоких частотах амплитуда колебаний падает быстрее, поэтому выбор наиболее высокой собственной частоты колебаний конструкции является правильным и с точки зрения устойчивости конструкции к воздействию удара. Конструкция должна обладать устойчивостью к ударным нагрузкам.

Аппаратура, противостоящая разрушающему действию ударов заданной величины и длительности и после их воздействия продолжающая нормально работать, называется ударопрочной, а аппаратура, нормально работающая при воздействии ударов, — удароустойчивой.

Механические воздействия приводят к перегрузкам. Перегрузкой называется отношение силы механического воздействия  $F$  к силе тяжести конструкции  $P$ . Перегрузка  $G = F/P$ .

Если на конструкцию действует вибрация, изменяющаяся по синусоидальному закону, то величину перегрузки определяют по формуле

$$G = A^2/250,$$

где  $A$  — амплитуда вибрации, мм;  $f$  — частота вибрации, Гц.

Величину перегрузки при ударах можно определить экспериментально с помощью специальных приборов, которые называются акселерометрами.

Основными методами защиты от механических воздействий являются виброизоляция аппаратуры с помощью амортизаторов и обеспечение механической жесткости и прочности конструкции.

Амортизаторы — это специальные устройства для снижения перегрузок, представляющие собой пружинящий элемент, соединяющий блоки или прибор с вибрирующим основанием (корпусом корабля, фюзеляжем самолета). Введение амортизаторов между электронной аппаратурой и объектом установки ослабляет амплитуду передаваемых колебаний, но не уничтожает их полностью. Поэтому необходимо дополнительно обеспечить жесткость и прочность конструкции.

Жесткость конструкции определяется отношением силы к деформации, вызванной этой силой. Критерием жесткости является обеспечение резонансной частоты конструкции, по крайней мере в три раза большей частоты воздействующих колебаний.

Под прочностью конструкции понимают нагрузку, которую может выдержать конструкция без остаточной деформации и разрушения. Повышение жесткости и прочности конструкции связано с усилением ее конструктивной основы, применением ребер жесткости, контррки болтовых соединений, заливкой и обволакиванием блоков, исключением зазоров.

При разработке РЭА обязательно проводят проверку на устойчивость против механических перегрузок на специальных испытательных стендах, осуществляющих вибрацию, тряску и т. д.

### § 1.3. Ремонтпригодность и взаимозаменяемость при эксплуатации РЭА

Большая часть РЭА в процессе эксплуатации подвергается ремонту. От быстрого и качественного ремонта зависит ее дальнейшая эксплуатация. Особенно большое значение имеет ремонт для длительно эксплуатируемой стационарной РЭА. Для радиоаппаратуры проводится два вида ремонта: профилактический и аварийный.

*Профилактический* ремонт проводится по плану и

время его ограничено запланированным перерывом в работе аппаратуры. Такой ремонт производится без нарушения нормального функционирования аппаратуры и является предупредительным. При профилактическом ремонте заменяются изношенные части, устраняются обнаруженные в процессе эксплуатации дефекты, которые в дальнейшем могли бы привести к отказу в работе.

*Аварийный* ремонт проводится в случае выхода из строя аппаратуры в процессе эксплуатации. Время аварийного ремонта должно быть минимальным. Если имеются запасные узлы или блоки, то они включаются для работы, а в это время проводится ремонт вышедших из строя устройств. Для оценки ремонтных качеств конструкции вводится понятие ремонтпригодности.

*Ремонтпригодность* РЭА — это приспособленность конструкции к восстановлению исправности и поддержанию заданной долговечности.

*Долговечность* — свойство конструкции сохранять работоспособность до предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонтов. Предельное состояние определяется возможностью дальнейшего использования устройства по назначению. Для повышения ремонтпригодности в конструкции необходимо предусмотреть: доступность всех входящих в конструкцию частей осмотру, ремонту и замене без предварительного удаления других частей конструкции; наличие контрольных точек для подсоединения измерительных приборов при контроле за работой РЭА; исключение возможности неправильного соединения разъемных частей; возможность установки извлекаемых частей на столе во время ремонта в удобных положениях; применение невыпадающих винтов, быстросъемных пружинных фиксаторов и т. п. с целью ускорения сборки и разборки конструкции; при конструировании массы крупных узлов и блоков следует выбирать такой, чтобы их мог свободно перемещать один человек.

Наиболее сложно обеспечить выполнение первого требования. Характерными конструкциями с обеспечением доступа к внутренним частям устройства являются книжная, веерная и кассетная (разъемная) конструкции блоков. Блок *книжной* конструкции (рис. 1.2, а, б) состоит из нескольких субблоков, которые могут откидываться, как страницы книги, вращаясь вокруг оси. Каждая страница может представлять собой печатную плату с установленными на ней интегральными микросхемами

и другими навесными объемными элементами, установленную в металлическую рамку. Монтаж осуществляется с помощью жгута из объемного провода, проходящего вдоль корешка книги. Смежные страницы могут иметь общий корешок, тогда монтаж между страницами удобно производить печатными шлейфами. Доступ ко всем частям конструкции можно обеспечить при включенном состоянии блока. В рабочем положении книга как бы закрыта, т. е. все субблоки стянуты винтами в плотный пакет, имеющий большую жесткость и хорошо выдерживающий механические перегрузки.

Блок *верной* конструкции (рис. 1.3) напоминает книжную конструкцию, но платы в нем поочередно могут подниматься для осуществления осмотра и ремонта. Электромонтаж в верной конструкции осуществляется жгутом вдоль оси поворота ячеек, и осмотр плат может производиться во включенном состоянии.

Блок *кассетной* (разъемной) конструкции (рис. 1.4, а, б) представляет собой каркас, на котором устанавливаются легкоустанавливаемые субблоки или кассеты. Каждая кассета устанавливается с помощью разъемов и фиксаторов, что очень удобно при замене отдельных кассет. Межкассетная коммутация осуществляется объемным проводом или печатным монтажом. Проверка кассет во включенном состоянии производится с помощью специального удлинителя, представляющего собой кассету с переключками и разъемами для подсоединения к блоку и основной кассете. Блоки кассетной конструкции, устанавливаемые на подвижных объектах, обычно имеют специальные ловители для обеспечения совмещения частей разъема на кассете и блоке и специальные узлы для механического закрепления кассет.

Если доступ к аппаратуре возможен только с одной стороны (отсек самолета, корабля), можно применять откидные блоки (рис. 1.5, а, б). В откинутом состоянии блок поддерживается одной или двумя шарнирными тягами и может проверяться во включенном состоянии. Для блоков, размещенных в стойках, используют выдвигание блоков (рис. 1.6). Блок выдвигается из стойки по специальным направляющим, которые обеспечивают поступательное движение блока с поворотом его на 90°. Межблочные соединения внутри стоек проходят по металлической арматуре каркаса и заканчиваются гибкой петлей с разъемом на конце. Такое включение позволяет

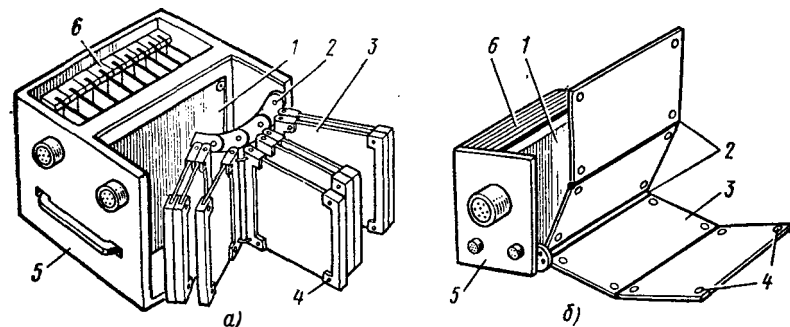


Рис. 1.2. Блок книжной конструкции:

а — с вертикальной осью раскрытия; б — с горизонтальной осью раскрытия; 1 — общая трассировочная плата; 2 — шарниры; 3 — функциональная ячейка; 4 — отверстие для стягивания ячеек в секцию; 5 — передняя панель; 6 — стянутая секция

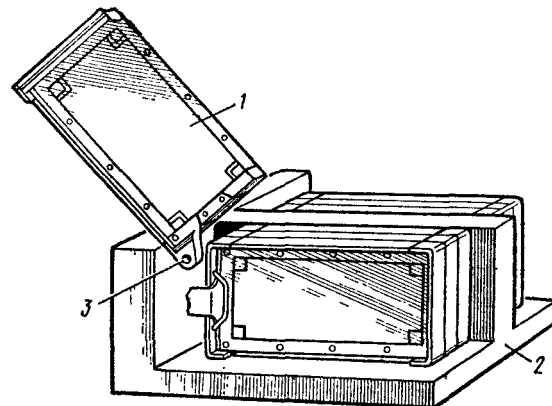


Рис. 1.3. Блок верной конструкции:

1 — функциональная ячейка; 2 — корпус блока; 3 — шарнир

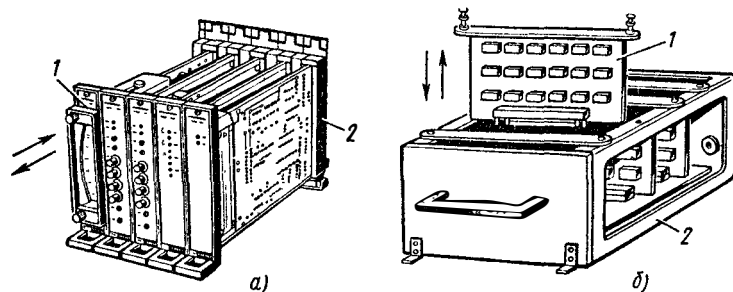


Рис. 1.4. Блок кассетной конструкции:

а — с выдвиганием функциональных ячеек в горизонтальной плоскости; б — с выдвиганием функциональных ячеек в вертикальной плоскости; 1 — функциональная ячейка; 2 — корпус блока

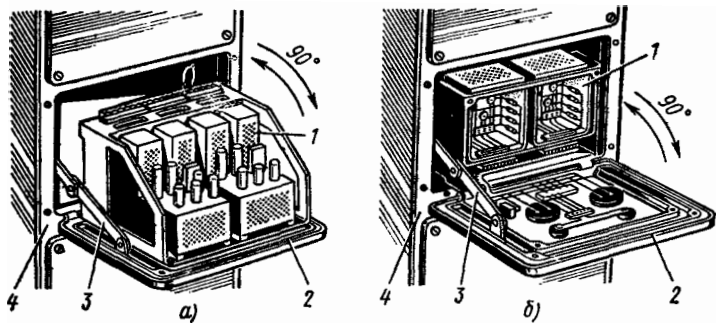


Рис. 1.5. Конструкция откидных блоков:

а — откинут весь блок; б — откинута лицевая панель; 1 — блок; 2 — лицевая панель; 3 — шарнирные тяги; 4 — корпус

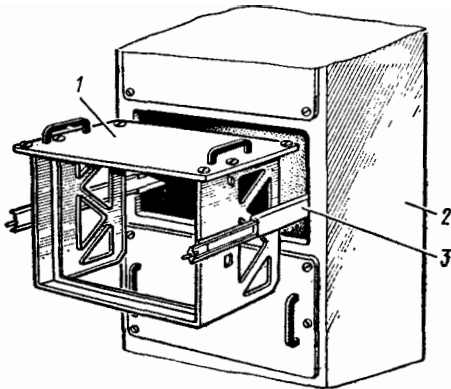


Рис. 1.6. Конструкция выдвижного блока:  
1 — шасси блока с передней панелью; 2 — корпус;  
3 — направляющие

Для осуществления взаимозаменяемости необходимо, чтобы заменяемые узлы и блоки имели одинаковые конструктивные размеры и присоединительные разъемы, а также одинаковые входные и выходные электрические характеристики. Для выполнения условий взаимозаменяемости задаются допустимые отклонения размеров и параметров, не нарушающие сочленения элементов конструкции и заданных электрических характеристик устройства. Каждое изделие РЭА обеспечивается комплектом запасных деталей, узлов, блоков. Взаимозаменяемость при эксплуатации можно обеспечить

заменой отдельных элементов (микросхем, резисторов, транзисторов), узлов (печатные платы, кассеты, модульные узлы) или блоков в целом. Выбор типа замены определяется стоимостью ремонта, квалификацией обслуживающего персонала, инструментами и измерительными приборами, которые имеются на месте ремонта.

При конструировании не следует забывать, что стремление к уменьшению массы и габаритов аппаратуры необходимо согласовывать с задачами ремонтпригодности и взаимозаменяемости. В случае миниатюризации аппаратуры задачи взаимозаменяемости и удобства ремонта решать значительно труднее. Чем выше миниатюризация аппаратуры, тем сложнее уход за ней.

## ГЛАВА 2

### КОНСТРУКТОРСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

#### § 2.1. Конструкторские документы и их классификация

К конструкторским документам относятся графические и текстовые документы, которые в отдельности или в совокупности определяют состав и устройство изделия и содержат все необходимые данные для его разработки или изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонта.

В зависимости от назначения документа ГОСТ 2.102—68 устанавливает 28 видов конструкторских документов, состоящих из текстовых и графических конструкторских документов. К текстовым конструкторским документам относятся: *пояснительная записка* (ПЗ) (описание и принцип действия разрабатываемого устройства, а также обоснование принятых при его разработке технических и технико-экономических решений); *технические условия* (ТУ) (эксплуатационные показатели изделия и методы контроля его качества); *программа и методика испытаний* (ПМ) (технические данные, подлежащие проверке при испытании изделий, а также порядок и методы их контроля); *расчеты* (РР) (расчеты параметров и величин); *эксплуатационные документы* предназначены для использования при эксплуатации, обслуживании и ремонте изделия в процессе эксплуатации; *ремонтные документы* (данные для проведения ремонтных работ на специализированных предприятиях); *патентный формуляр* (сведения о патентной чистоте объекта, а также о созданных и использованных при его разработке отечественных изобретениях); *карта техни-*

*ческого уровня* (данные, определяющие технический уровень качества изделия и соответствие его технических и экономических показателей достижениям науки и техники, а также потребностям народного хозяйства); *инструкция* (указания и правила, используемые при изготовлении изделия, сборке, регулировке, контроле, приемке и т. п.); *спецификация* — определяет состав сборочной единицы, комплекса или комплекта; *таблицы* — содержат в зависимости от назначения соответствующие данные; *ведомости* спецификаций, ссылочных документов, покупных изделий, согласования применения изделий, держателей подлинников и т. п. — содержат перечни соответствующих документов, изделий, предприятий и т. п.

К графическим конструкторским документам относятся: чертеж детали (изображение детали и другие данные, необходимые для ее изготовления и контроля); сборочный чертеж (СБ) (изображение изделия и другие данные, необходимые для его сборки и контроля); чертеж общего вида (ВО) — определяет конструкцию изделия, взаимодействие его основных составных частей и поясняет принцип работы изделия; теоретический чертеж (ТЧ) — определяет геометрическую форму изделия и координаты расположения составных частей; габаритный чертеж (ГЧ) — содержит контурное (упрощенное) изображение изделия с габаритными, установочными и присоединительными размерами; электромонтажный чертеж (МЭ) — содержит данные, необходимые для выполнения электрического монтажа изделия; схема — конструкторский документ, на котором показаны в виде условных изображений или обозначений составные части изделия и связи между ними.

Классификацию схем на виды, типы и общие правила выполнения всех схем устанавливает ГОСТ 2.701—76, полностью соответствующий стандарту СЭВ 651—77.

Все схемы в зависимости от видов элементов и связей между ними подразделяют на виды. Каждый вид схемы обозначают буквой. В промышленности используются схемы следующих видов: электрические — Э; гидравлические — Г; пневматические — П; кинематические — К; оптические — Л.

При необходимости могут разрабатываться схемы других видов: вакуумные, газовые, автоматизации, энергетические, комбинированные. Основным видом схем в радиоэлектронной аппаратуре являются электрические схемы.

В зависимости от основного назначения схемы подразделяют на типы. Каждый тип схемы обозначается цифрой. По типам схемы классифицируют, как показано в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Наименование схемы	Обозначение типа схемы	Наименование схемы	Обозначение типа схемы
Структурные	1	Подключения	5
Функциональные	2	Общие	6
Принципиальные	3	Расположе-	7
Соединений	4	ния	

*Структурные* схемы определяют основные функциональные части изделия, их назначение и взаимосвязи. Структурные схемы разрабатывают раньше других схем и используют для общего ознакомления с изделием.

*Функциональные* схемы разъясняют определенные процессы, протекающие в отдельных функциональных цепях изделия или во всем изделии в целом. Функциональными схемами пользуются для изучения принципов работы изделий, а также при их наладке, регулировке, контроле и ремонте.

*Принципиальные* схемы определяют полный состав элементов и связей между ними и, как правило, дают детальное представление о принципах работы изделия. Принципиальные схемы служат основанием для разработки других конструкторских документов, для изучения принципов работы изделия, а также при наладке, регулировке, контроле и ремонте изделия.

*Схемы соединений* показывают соединения составных частей изделия и определяют провода, жгуты, кабели, которыми осуществляются эти соединения, а также места их присоединения и ввода. Схематическими соединениями пользуются для разработки других конструкторских документов, для осуществления присоединений при контроле, ремонте и эксплуатации изделия.

*Схемы подключения* показывают внешние подключения изделия и используются для осуществления подключений изделия, при эксплуатации изделий, при разработке других конструкторских документов.

*Общие* схемы определяют составные части комплекса и соединения их между собой на месте эксплуатации. Общими схемами пользуются при ознакомлении с комп-

лексами, а также при их контроле и эксплуатации. В отдельных технически обоснованных случаях общие схемы могут выпускаться не только на комплексы, но и на сборочные единицы.

Схемы *расположения* определяют относительное расположение составных частей изделия, а при необходимости также проводов, жгутов, кабелей и т. д. Схемами расположения пользуются при разработке других конструкторских документов, а также при изготовлении, ремонте и эксплуатации изделий.

Электрические схемы могут быть всех рассмотренных типов. Номенклатура и количество типов схем, которые разрабатываются для каждого конкретного изделия, зависят от сложности и особенностей изделия и определяются разработчиком изделия. Необходимо, чтобы комплект выпускаемых на изделие схем содержал все необходимые данные для проектирования, изготовления, эксплуатации и ремонта изделия. Схемы выпускаются в виде самостоятельных конструкторских документов. При этом каждой схеме присваивают обозначение изделия и шифр схемы, который состоит из буквы, определяющей вид схемы, и цифры, определяющей тип схемы, например Э4 — схема электрическая соединений.

Все конструкторские документы классифицируют в зависимости от способа их выполнения и характера использования на оригиналы, подлинники, дубликаты и копии.

*Оригиналы* — конструкторские документы, выполненные на любом материале и предназначенные для изготовления по ним подлинника. *Подлинники* — конструкторские документы, оформленные подлинными установленными подписями и выполненные на любом материале, позволяющем многократное воспроизведение с них копий.

*Дубликаты* — это копии подлинников, обеспечивающие идентичность воспроизведения подлинника, выполненные на любом материале, позволяющем снятие с них копий. Дубликаты предназначены для снятия с них копий на разных предприятиях, выпускающих одно и то же изделие.

*Копии* — конструкторские документы, выполненные способом, обеспечивающим их идентичность с подлинником (дубликатом) и предназначенные для непосредственного использования при разработке, в производстве, эксплуатации и ремонте изделий.

Конструкторские документы классифицируют также по комплектности. При определении комплектности различают: основной конструкторский документ; основной комплект конструкторских документов; полный комплект конструкторских документов.

*Основной конструкторский документ* изделия в отдельности или в совокупности с другими записанными в нем конструкторскими документами полностью и однозначно определяет данное изделие и его состав. За основной конструкторский документ принимается: для деталей — чертеж детали, а для сборочных единиц, комплексов и комплектов — спецификация.

*Основной комплект* конструкторских документов изделия объединяет конструкторские документы, относящиеся ко всему изделию, т. е. документы, выпущенные на все изделия в целом, например структурная и принципиальная схема осциллографа, сборочный чертеж телевизора. Конструкторские документы, выпущенные на составные части изделия, в основной комплект конструкторских документов не входят.

В *полный комплект* конструкторских документов в общем случае входят: основной комплект конструкторских документов на данное изделие; основные комплекты конструкторских документов на все составные части данного изделия, примененные по своим основным конструкторским документам.

Номенклатура конструкторских документов, разрабатываемых на каждое конкретное изделие, различна и будет зависеть от сложности изделия и его состава. Кроме того, номенклатура документов различна для разных стадий разработки изделия.

## § 2.2. Стадии разработки конструкторской документации

Необходимые стадии разработки конструкторской документации на изделия всех отраслей промышленности устанавливает ГОСТ 2.103—68. Устанавливаются следующие стадии разработки конструкторской документации: техническое предложение, эскизный проект, технический проект, рабочая конструкторская документация.

Разработка начинается после подписания договора между разработчиком и заказчиком и ведется в соответствии с техническим заданием на разработку. Первой стадией разработки является техническое предложение.

Техническое предложение представляет

собой совокупность конструкторских документов, которые должны содержать технические и технико-экономические обоснования целесообразности разработки документации изделия. Разработка технического предложения производится на основании анализа технического задания заказчика и различных вариантов возможных решений, сравнительной оценки решений с учетом конструктивных и эксплуатационных особенностей разрабатываемого и существующих изделий, а также патентных исследований. Этап технического предложения складывается из отбора материалов, разработки технического предложения, рассмотрения и утверждения этого предложения. После рассмотрения и утверждения в установленном порядке оно является основанием для разработки эскизного (технического) проекта, а конструкторской документации присваивается литера «П».

Эскизный проект — это совокупность конструкторских документов, которые должны содержать принципиальные конструкторские решения, дающие общее представление об устройстве и принципе работы изделия, а также данные, определяющие назначение, основные параметры и габаритные размеры разрабатываемого изделия. Разработка эскизного проекта включает детальную проработку возможности построения аппаратуры, удовлетворяющей требованиям технического задания, и идет по пути разработки схем и конструкции изделия. На этапе эскизного проекта изготавливают первые макеты изделия и проводят испытания отдельных узлов и блоков аппаратуры на соответствие их электрическим характеристикам, включая необходимые температурные испытания. По результатам работы составляют научно-технический отчет, содержащий обоснование функциональной схемы изделия, электрические расчеты основных узлов и блоков. Отчет и действующие макеты отдельных наиболее ответственных узлов и блоков предъявляются заказчику. Эскизный проект рассматривается и утверждается в установленном порядке, конструкторской документации присваивается литера «Э». После утверждения эскизный проект является основанием для разработки технического проекта или рабочей конструкторской документации.

Технический проект — это совокупность конструкторских документов, которые должны содержать окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве разрабатываемого изделия,

и исходные данные для разработки рабочей документации. На стадии технического проекта производится детальная отработка схемных и конструкторских решений. Конструкторские подразделения выпускают чертежи на все детали, узлы, блоки и приборы, детально обрабатывают защиту аппаратуры от внешних воздействий, привязку к объекту установки, решают вопросы внешней компоновки изделия и т. д. Изготавливаемые на этапе технического проекта макеты предъявляются на испытания, которые проводятся в соответствии с составленной программой и методикой испытаний. Заказчику предъявляются протоколы испытаний и технический отчет, в котором приводятся уточненные расчеты схем, обосновывается выбор конструктивных решений и даются все конструкторские расчеты. Технический проект рассматривается, утверждается и конструкторской документации присваивается литера «Т». После утверждения технический проект является основанием для разработки рабочей документации.

Конструкторская документация, разработанная на этапах технического предложения, эскизного и технического проекта, называется проектной документацией.

Рабочая конструкторская документация разрабатывается для изготовления изделий в серийном или массовом производстве. Разработка рабочей документации состоит в окончательной отработке документации и проведении корректировок документации по результатам изготовления изделий и их испытаний. Прежде всего изготавливаются опытные образцы или опытная партия изделий. Изготовленные изделия подвергаются предварительным испытаниям, которые проводятся в полном объеме по техническим условиям. Испытания на воздействие всех внешних факторов производятся в специально оборудованных испытательных лабораториях с помощью камер и стендов, имитирующих воздействие климатических и механических факторов. Если нельзя полностью воспроизвести комплекс воздействующих факторов, то проводят полевые, летные и другие испытания. По результатам изготовления и испытаний проводится корректировка всей конструкторской документации. Откорректированной документации присваивается литера «О». Затем производятся приемочные испытания опытных образцов (опытной партии). По результатам приемочных испытаний и после устранения замечаний приемочной комиссией производится корректировка кон-



конструкторских документов с присвоением литеры «О<sub>1</sub>». После этого конструкторская документация подготавливается и передается серийному заводу для изготовления изделия в серийном или массовом производстве.

Завод-изготовитель проводит подготовку производства для изготовления данного конкретного изделия и по документации с литерой «О<sub>1</sub>» изготавливает установочную партию изделий. По результатам изготовления, испытаний и оснащения технологического процесса производится корректировка конструкторской документации с присвоением документам литеры «А».

Затем по откорректированной документации изготавливается и испытывается головная (контрольная) серия, после чего изделия выпускают в серийном или массовом производстве. Для некоторых категорий специальной аппаратуры после изготовления головной серии еще раз производится корректировка документации с присвоением ей литеры «Б».

Рассмотренные этапы разработки конструкторской документации в полном объеме используются при разработке сложной РЭА. Для простой РЭА или при модернизации изделий отдельные этапы могут быть опущены. В техническом задании на разработку изделия устанавливаются необходимые стадии разработки конструкторской документации.

### § 2.3. Организация работы с конструкторской документацией на предприятии

На предприятиях, разрабатывающих или изготавливающих изделия РЭА, в обращении находится большое количество конструкторской документации. Для работы с ней на каждом предприятии существует отдел технической документации (ОТД), а для предприятий с небольшим объемом конструкторских документов бюро технической документации (БТД).

Структура ОТД и функции его отдельных подразделений определяются в соответствии со структурой предприятия. ОТД состоит из бюро, а БТД из групп, круг обязанностей которых четко определен. Основными направлениями работы ОТД (БТД) являются: хранение подлинников и дубликатов конструкторских документов — занимается бюро (группа) подлинников; хранение копий конструкторских документов, обеспечение этой документацией подразделений предприятия — занимается

группа копий; прием, регистрация и выдача подлинников, дубликатов и копий конструкторских документов, учет, состояние и движение этих документов; учет применяемости конструкторских документов, изменение применяемости и изменения состояния документов, оформление нарядов на размножение конструкторских документов, выдача справок о состоянии и применяемости документов — занимается бюро (группа) учета; внесение изменений в конструкторские документы на основании «Извещений об изменении», учет внесения изменений по «Извещениям об изменении» — занимается бюро (группа) изменений документов; комплектация конструкторских документов после размножения, обеспечение документацией внешних абонентов — занимается бюро (группа) комплектации.

Для размножения конструкторской документации организуются цехи или мастерские. На больших предприятиях имеется типография.

Для контроля конструкторской документации на соответствие стандартам всех категорий и другой нормативно-технической документации на предприятиях организуется нормоконтроль. Как правило, нормоконтроль является отдельным подразделением, входящим в отдел стандартизации. Порядок проведения нормоконтроля конструкторских документов устанавливает ГОСТ 2.111—68. Нормоконтроль — завершающий этап разработки конструкторской документации. Ему подвергается вся конструкторская документация основного и вспомогательного производства независимо от подчиненности и служебных функций подразделений, выпустивших документацию. Нормоконтроль должен проверить соблюдение требований стандартов всех категорий, правильность выполнения конструкторских документов в соответствии с ЕСКД, уровень стандартизации и унификации в изделии, рациональное использование ограничительных номенклатур стандартизованных изделий и других конструктивных норм. Нормоконтроль имеет право возвращать конструкторскую документацию разработчику при нарушении установленной комплектности документов, отсутствии обязательных подписей, небрежного выполнения документов. Изменения и исправления, указанные нормоконтролем, являются обязательными для внесения в конструкторские документы. Замечания и предложения нормоконтролера по документации изделия служат основанием для оценки качества документации. Нормокон-



трлер несет ответственность за соблюдение в конструкторской документации требований стандартов и другой нормативно-технической документации наравне с разработчиками конструкторской документации. Без подписи нормоконтролера подлинники конструкторских документов на хранение в ОТД не принимаются.

Правила учета и хранения конструкторских документов устанавливает ГОСТ 2.501—68. Согласно требованиям ГОСТа все имеющиеся на предприятии подлинники, дубликаты и копии конструкторских документов подлежат учету и хранению в ОТД (БТД) предприятия. ГОСТ устанавливает правила для хранения подлинников, дубликатов, копий и оригиналов конструкторских документов.

В период разработки изделия подлинники конструкторских документов должны храниться в ОТД (БТД) предприятия-разработчика, а в период серийного или массового производства — в ОТД (БТД) предприятия-изготовителя изделия. Все подлинники, принятые на хранение в ОТД, хранятся в группе подлинников ОТД и регистрируются в инвентарной книге подлинников. Каждому подлиннику документа присваивают один инвентарный номер независимо от количества листов.

Правила учета и хранения дубликатов полностью соответствуют правилам учета и хранения подлинников. На предприятиях-дублерах дубликаты действуют на правах подлинников. Хранят дубликаты отдельно от подлинников в группе подлинников.

Все копии конструкторских документов, изготовленные на данном предприятии любым способом, должны храниться в бюро копий ОТД, где хранят архивные, контрольные и рабочие копии.

*Архивные* копии отражают состояние конструкции изделия в период утверждения их заказчиком, управлением, передачи подлинников предприятиям-изготовителям и прекращения производства данной конструкции. Архивные копии хранят отдельно от других копий, из бюро копий не выдают, изменения в архивные копии не вносят. На каждой архивной копии ставят штамп «Архивный экземпляр».

*Контрольные* копии служат для справок или сверки конструкторской документации. Их хранят в бюро копий отдельно от других копий и из бюро не выдают. На каждой контрольной копии ставят штамп «Контрольный экземпляр».

*Рабочие* копии служат для непосредственной работы в подразделениях предприятия. Их выдают из бюро копий исполнителям на определенный срок. Все поступившие в ОТД на хранение копии регистрируют в карточке учета. В случае необходимости организуется группа рабочих копий, которая занимается комплектованием рабочих копий для всех подразделений предприятия.

Оригиналы конструкторских документов после снятия с них подлинников на хранение в ОТД не поступают. Они обычно хранятся в выпустившем их подразделении.

При разработке и изготовлении изделия возникает необходимость исправлять конструкторские документы, что может быть вызвано доработкой и улучшением параметров изделия, исключением каких-либо элементов схемы, заменой материалов и, наконец, просто исправлением ошибок разработчика или конструктора. В этих случаях необходимо внести изменения в конструкторскую документацию. Под изменением конструкторского документа понимается любое исправление, исключение или добавление каких-либо данных без изменения обозначения документа. Правила внесения изменений устанавливает ГОСТ 2.503—74, соответствующий стандарту СТ СЭВ 1631—79.

Вносить изменения в конструкторские документы имеет право только предприятие-держатель подлинников конструкторских документов, а на предприятии — подразделение, выпустившее подлинники, или подразделение-держатель подлинников, ведущее наблюдение за изготовлением изделий.

Изменения вносятся на основании «Извещения об изменении», в котором указывается, что и где надо изменить, каким способом, причина изменения, применяемость измененного документа и т. д. Изменения в одном документе могут повлечь за собой изменения в других. Например, при добавлении в принципиальную схему одной микросхемы необходимо изменить сборочный чертеж платы, где будет стоять эта микросхема, схему соединений, спецификацию и т. д. Поэтому выпуск «Извещения» на один документ должен сопровождаться выпуском «Извещений» на все взаимосвязанные документы. Может выпускаться «Предварительное извещение» (ПИ), когда в документе обнаружена ошибка, которая может вызвать брак изделия или задержать производство. «Предварительное извещение» также имеет право выпускать только предприятие-держатель подлинников.

При обнаружении ошибки в документации в производстве допускается исправление рабочих цеховых экземпляров документов, которое вносит ответственное лицо, оно же заверяет изменения своей подписью, регистрирует в цеховом журнале. Впоследствии на изменение выпускается «Извещение».

Изменения в конструкторские документы вносят зачеркиванием, подчисткой (смывкой) в зависимости от вида документа, насыщенности графики и т. п. Например, в контрольные и рабочие копии конструкторских документов изменения вносятся только зачеркиванием; в подлинники электромонтажных чертежей, чертежей печатных плат с координатной сеткой, паспортов изменения, как правило, вносятся подчисткой.

Прежде всего изменения вносятся в подлинники и контрольные копии конструкторских документов. Эта работа проводится в бюро изменений документов ОТД. Затем вносятся изменения в рабочие копии, которые зарегистрированы в карточках учета. Если копии высылают каким-либо абонентам и впоследствии их не извещают об изменениях в документах, то на таких рабочих копиях ставится штамп «Об изменении не сообщается».

Если на предприятии-держателе подлинников учтены дубликаты, по которым работают предприятия-дублеры, то при внесении изменений в подлинники предприятие-держатель подлинников должно выслать предприятию-дублеру дубликат измененного подлинника вместе с копией «Извещения об изменении» подлинника. Вносить изменения в дубликаты вручную допускается только по согласованию с заказчиком.

## ГЛАВА 3

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЭА С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ НАДЕЖНОСТИ

#### § 3.1. Основные определения теории надежности

Современная РЭА имеет очень высокую функциональную сложность. При непрерывном усложнении радиотехнических приборов и систем наблюдается диспропорция между темпами роста сложности и покомпонентной надежности РЭА. Особое значение приобретает проблема надежности для систем управления сложными автоматическими процессами, для систем бортовой РЭА.

Необходимо также учитывать, что элементной базой для современной специальной аппаратуры являются интегральные микросхемы (ИМС), где отказ каждой из них может привести к выходу из строя аппаратуры в целом. Таким образом, при проектировании РЭА одной из основных задач является задача обеспечения требуемой надежности.

В Советском Союзе основные понятия надежности определяются Государственными стандартами. Надежность определяется как свойство аппаратуры выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Обеспечение надежности является многоплановой задачей. Над обеспечением надежности современной РЭА работают большие коллективы ученых, разработчиков, производителей и эксплуатационников. В ряде случаев задача обеспечения надежности приобретает первостепенное значение и имеет приоритет перед задачами обеспечения минимальных габаритов, массы и стоимости аппаратуры.

Из определения надежности следует, что надежность является комплексным свойством аппаратуры, которое в зависимости от сложности изделия и условий его эксплуатации может характеризоваться одним или целым набором показателей надежности, основным из которых является безотказность в работе.

Безотказностью называется свойство аппаратуры непрерывно сохранять работоспособность в течение определенного времени. Применительно к изделиям современной РЭА требования к надежности нельзя ограничить только безотказностью в работе, а необходимо также обеспечивать долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость. Поэтому обеспечение надежности надо рассматривать и как задачу устранения возможных причин нарушения этих свойств аппаратуры. Надежность — это качественное понятие, которое трудно оценить каким-либо одним числовым показателем. В теории надежности одним из самых важных является понятие отказа.

Отказом называется событие, заключающееся в полной или частичной потере работоспособности изделия. Все отказы принято делить на две категории: катастрофические (внезапные) и параметрические (постепенные). Катастрофические отказы возникают мгновенно в ре-

зультате концентрации перегрузок и скачкообразного изменения значений одного или нескольких параметров аппаратуры, а *параметрические* — в результате постепенного равномерного ухода параметров за пределы установленных допусков.

При решении задач обеспечения надежности разрабатываемой аппаратуры приходится учитывать специфику и многообразие радиотехнических устройств. Поэтому с позиций надежности различают восстанавливаемые и невосстанавливаемые системы, однофункциональные и многофункциональные, обслуживаемые и необслуживаемые, кратковременного или длительного использования.

Восстанавливаемыми называются такие системы, которые в процессе выполнения своих функций допускают ремонт. После ремонта такие системы продолжают выполнять свои функции. Большинство современных видов РЭА относятся к восстанавливаемым системам. Примерами восстанавливаемой аппаратуры могут служить ЭВМ, радиолокационные станции, бытовая РЭА.

Невосстанавливаемыми называются такие системы, которые в процессе выполнения своих функций не допускают ремонта. После выхода из строя такие изделия не подлежат восстановлению по техническим или экономическим соображениям. К таким изделиям относятся, например, искусственные спутники Земли.

Если система предназначена для выполнения какой-либо одной задачи, то она однофункциональная, а если система должна выполнять комплекс задач, то она многофункциональная. Примером однофункциональной системы может служить бытовой телевизор, а многофункциональной — современная ЭВМ. К обслуживаемым системам относятся системы, которые в течение большого времени могут подвергаться профилактическим осмотрам и ремонту. На необслуживаемых системах профилактический осмотр и ремонт не проводятся. Обслуживаемые системы не обязательно должны быть восстанавливаемыми. Деление РЭА на аппаратуру кратковременного или длительного использования связано с назначением системы. Например, самолетные или наземные радиолокационные станции, системы управления производственным оборудованием относятся к системам длительного использования, а РЭА зенитных управляемых ракет работает кратковременно по сравнению с периодом хранения. Рассмотренная классификация аппарату-

ры необходима для правильного выбора методики расчетов надежности и методов выявления и устранения возможных причин ненадежности.

### § 3.2. Количественные характеристики теории надежности

Для оценки РЭА используются критерии надежности. Критерием надежности называется признак, по которому оценивается надежность различных изделий, а характеристикой — количественное значение критерия надежности конкретного изделия. Выбор количественных характеристик надежности зависит от класса проектируемой РЭА.

Основные критерии надежности можно разбить на две группы: а) характеризующие надежность невосстанавливаемых изделий; б) характеризующие надежность восстанавливаемых изделий.

Критериями надежности невосстанавливаемых изделий являются: интенсивность отказов  $\Lambda(t)$ ; вероятность безотказной работы в течение определенного времени  $P(t)$ ; вероятность отказа в течение определенного времени  $Q(t)$ ; средняя наработка до первого отказа  $T_{ср}$ .

При анализе невосстанавливаемых изделий будем считать, что испытаниям на надежность подвергается  $N$  изделий и испытания будут закончены, если все изделия вышли из строя, причем вместо отказавших новые или отремонтированные изделия не ставятся. В этом случае под интенсивностью отказов понимается отношение числа отказавших изделий в единицу времени к среднему числу изделий, исправно работающих в данный отрезок времени:

$$\Lambda(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{ср}(\Delta t)}, \quad (3.1)$$

где  $n(\Delta t)$  — число отказавших изделий в интервале времени  $\Delta t$ ;  $N_{ср} = (N_i + N_{i+1})/2$  — среднее число исправно работающих изделий в интервале времени  $\Delta t$ ;  $N_i$  — число изделий, исправно работающих в начале интервала;  $N_{i+1}$  — число изделий, исправно работающих в конце интервала. Выражение (3.1) — статистическое определение интенсивности отказов.

Надежность элементов радиоаппаратуры также характеризуется интенсивностью отказов. Интенсивность отказов элементов показывает, какая доля элементов

данного типа в среднем выходит из строя за 1 ч работы. В дальнейшем интенсивность отказов элементов будем обозначать  $\lambda$ , а интенсивность отказов изделия —  $\Lambda$ . Значения интенсивностей отказов элементов радиоаппаратуры определены экспериментально на основании анализа результатов эксплуатации большого количества изделий и помещены в справочниках по надежности. При выборе

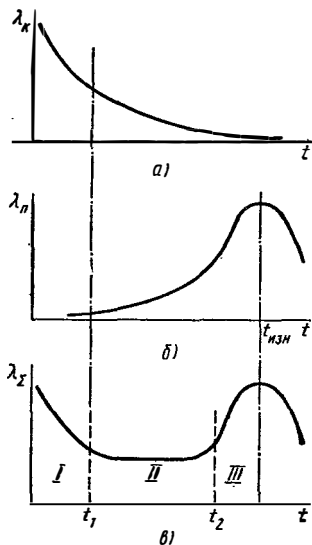


Рис. 3.1. Зависимость интенсивности отказов элементов от времени: а — катастрофических; б — параметрических; в — суммарная характеристика

3.1, в) можно разделить на три периода: I — период приработки от начала работы до  $t_1$ ; II — период нормальной работы от  $t_1$  до  $t_2$ ; III — период старения и износа после  $t_2$ . В период приработки из строя выходят элементы со скрытыми дефектами. По мере выхода из строя таких элементов интенсивность отказов уменьшается. Для сокращения времени приработки проводят тренировку элементов. Значения интенсивностей отказов элементов определяются для периода нормальной работы, где могут происходить только отдельные случайные отказы. При отработке аппаратуры на надежность изменением конструкции, совершенствованием технологических про-

цессов или ослаблением влияния внешних факторов добиваются, чтобы суммарная интенсивность отказов была минимальной и примерно постоянной в течение всего периода нормальной эксплуатации аппаратуры. Продолжительность периода нормальной работы различна для различных элементов РЭА, так как старение одних элементов наступает через тысячи часов работы, а для других через десятки тысяч часов. При расчете интенсивности отказов изделия необходимо знать номенклатуру и количество входящих в схему элементов. При этом

$$\Lambda = \lambda_1 n_1 + \lambda_2 n_2 + \lambda_3 n_3 + \dots + \lambda_n n_n, \quad (3.2)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$  — интенсивности отказов элементов схемы;  $n_1, n_2, n_3, \dots, n_n$  — количество элементов каждого типа в схеме.

Вероятностью безотказной работы называется вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени не произойдет ни одного отказа. Если считать, что интенсивность отказа определяется для периода нормальной работы, то вероятность безотказной работы  $P(t)$  подчиняется экспоненциальному закону распределения отказов

$$P(t) = e^{-\Lambda t_p}, \quad (3.3)$$

где  $e$  — основание натуральных логарифмов;  $t_p$  — время нормальной работы изделия в интервале времени от  $t_1$  до  $t_2$ .

Вероятность безотказной работы по статистическим данным об отказах, полученным в результате испытания аппаратуры на надежность, оценивается выражением

$$\overline{P}(t) = \frac{N - n(t)}{N}, \quad (3.4)$$

где  $N$  — количество изделий в начале испытаний;  $n(t)$  — количество отказавших изделий за время  $t$ .

При большом числе изделий  $N$  статистическая вероятность безотказной работы  $\overline{P}(t)$  совпадает с вероятностью безотказной работы  $P(t)$ , рассчитанной по формуле (3.3). На практике часто вместо характеристики вероятности безотказной работы  $P(t)$  пользуются характеристикой вероятности отказа  $Q(t)$ . Вероятностью отказа называется вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале

времени возникнет хотя бы один отказ. Отказ и безотказная работа являются событиями несовместимыми и противоположными, поэтому

$$Q(t) = 1 - P(t). \quad (3.5)$$

По статистическим данным вероятность отказа можно определить из выражения

$$Q(t) = n(t)/N. \quad (3.6)$$

Средней наработкой до первого отказа называется математическое ожидание времени работы изделия до отказа. По статистическим данным об отказах среднюю наработку до первого отказа вычисляют по формуле

$$T_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}, \quad (3.7)$$

где  $t_i$  — время безотказной работы  $i$ -го образца;  $N$  — число испытываемых образцов.

Средняя наработка до первого отказа связана с интенсивностью отказов соотношением

$$T_{\text{ср}} = 1/\Lambda. \quad (3.8)$$

Рассмотренные критерии надежности позволяют достаточно полно оценить надежность невосстанавливаемой РЭА. Надежность изделия не всегда нужно оценивать по всем критериям. Выбор конкретных критериев оценки надежности зависит от класса проектируемой аппаратуры. Наиболее удобной характеристикой надежности элементов РЭА является интенсивность отказов, так как позволяет более просто вычислять количественные характеристики надежности сложной системы. Для сложных систем целесообразно использовать вероятность безотказной работы, так как она характеризует изменение надежности во времени и дает возможность сравнительно просто определять надежность в процессе проектирования и испытаний.

Для оценки надежности восстанавливаемых изделий могут использоваться рассмотренные критерии надежности невосстанавливаемой аппаратуры при условии, что время работы берется до первого отказа. Другими критериями надежности восстанавливаемой аппаратуры

являются: наработка на отказ  $T_0$ ; коэффициент готовности  $K_r$ ; коэффициент вынужденного простоя  $K_{\text{п}}$ .

При анализе восстанавливаемых изделий будем считать, что на испытании находится  $N$  изделий и отказавшие изделия немедленно заменяются исправными (новыми или отремонтированными).

Испытания считаются законченными, если число отказов достигает величины, достаточной для оценки надежности с определенной вероятностью. Если не учитывать время, затраченное на восстановление изделия, то достаточно наглядной характеристикой является наработка на отказ. Нарботкой на отказ называется среднее время между соседними отказами. По статистическим данным об отказах наработка на отказ определяется по формуле

$$T_0 = \sum_{i=1}^n t_i/n, \quad (3.9)$$

где  $t_i$  — время исправной работы изделия между  $(i-1)$ -м и  $i$ -м отказами;  $n$  — число отказов за некоторое время  $t$ .

Если учитывать время, затраченное на восстановление изделия, то надежность восстанавливаемых изделий достаточно полно характеризуется коэффициентом готовности и коэффициентом вынужденного простоя.

Коэффициентом готовности называется отношение времени исправной работы к сумме времени исправной работы и времени вынужденных простоев, взятых за один и тот же календарный срок. Согласно определению,

$$K_r = t_p/(t_p + t_{\text{п}}), \quad (3.10)$$

где  $K_r$  — коэффициент готовности;  $t_p$  — суммарное время исправной работы изделия;  $t_{\text{п}}$  — суммарное время вынужденного простоя.

Коэффициентом вынужденного простоя называется отношение времени вынужденных простоев к сумме времени исправной работы и времени вынужденных простоев изделия, взятых за один и тот же календарный срок. Тогда коэффициент вынужденного простоя определяют по формуле

$$K_{\text{п}} = t_{\text{п}}/(t_p + t_{\text{п}}). \quad (3.11)$$

Коэффициент готовности и коэффициент вынужденного простоя связаны между собой простой зависимостью

$$K_{гн} = 1 - K_{р}. \quad (3.12)$$

Время вынужденного простоя складывается из времени, затраченного на отыскание и устранение неисправностей в аппаратуре. Поэтому коэффициент готовности и коэффициент вынужденного простоя в определенной мере зависят от правильного выбора конструктивных решений, выбора методов повышения ремонтпригодности и взаимозаменяемости в аппаратуре.

### § 3.3. Расчеты надежности при проектировании РЭА

Надежность РЭА зависит не только от выбора схемы и технических характеристик аппаратуры, но и от режимов работы аппаратуры и условий ее эксплуатации; от технологии производства и от используемой в производстве системы контроля качества; от качества исходных материалов и комплектующих элементов; от уровня квалификации производственного, контрольного и эксплуатирующего аппаратуру персонала.

Обеспечить высокую надежность аппаратуры можно суммой мероприятий, выполняемых на всех этапах разработки, производства и эксплуатации. Особое место в этом процессе принадлежит этапу разработки, так как все принципы обеспечения надежности выбирают на этом этапе. Разработчик современной ответственной РЭА должен стремиться обеспечить чрезвычайно высокую надежность аппаратуры, учитывая все реальные эксплуатационные ситуации. При этом необходимо удовлетворить целый ряд основных требований к изделию: обеспечение ее необходимых технических и тактико-технических характеристик (габариты, масса, чувствительность, точность, быстродействие, время приведения в готовность), ограничение конструктивной сложности, снижение стоимости и сроков разработки и т. д. Разработчик должен выбрать оптимальное решение, обеспечивающее и высокую надежность, и требуемые технические характеристики.

Требования к надежности разрабатываемого изделия задаются в техническом задании на разработку. На ранних стадиях разработки изделия составляется план обеспечения надежности, который на последующих стадиях

разработки детализируется и уточняется. Одним из элементов этого плана является расчет надежности проектируемого изделия. Первые расчеты надежности делают на ранних стадиях разработки, а с уточнением сведений об изделии уточняются и расчеты надежности. Существующие методы расчета надежности позволяют получить расчетным путем количественные характеристики надежности разрабатываемого изделия и сопоставить эти характеристики с заданными в техническом задании. Все расчеты надежности в основном сводятся к определению вероятности безотказной работы  $P(t)$  и средней наработки до первого отказа  $T_{ср}$  по известным интенсивностям отказов элементов схемы. В зависимости от полноты учета факторов, влияющих на работу изделия и его надежность, последовательно проводят три расчета надежности: прикидочный, ориентировочный, окончательный.

*Прикидочный* расчет позволяет судить о принципиальной возможности обеспечения требуемой надежности изделия. Этот расчет используется при проверке требований по надежности, выдвинутых заказчиком в техническом задании, при сравнительной оценке надежности отдельных вариантов выполнения изделия на ранних стадиях разработки изделия и ряде других случаев. При прикидочном расчете делается допущение, что все элементы схемы равнонадежны, так как принципиальные электрические схемы на изделие и его составные части еще окончательно не разработаны. Соединение элементов с точки зрения надежности таково, что выход из строя любого элемента приводит к отказу всего изделия. Интенсивности отказов элементов берутся для периода нормальной работы, т. е.  $\lambda_i(t) = \text{const}$ . Тогда

$$\Lambda = \lambda_i N, \quad (3.13)$$

где  $\lambda_i$  — средняя интенсивность отказов равнонадежных элементов схемы;  $N$  — общее количество элементов.

*Ориентировочный* расчет проводится тогда, когда на изделие и все его составные части разработаны электрические принципиальные схемы. При ориентировочном расчете учитывается влияние на надежность изделия количества и типов применяемых в схемах элементов. При расчете делаются следующие допущения: все элементы схемы работают в нормальном режиме, предусмотренном техническими условиями на эти элементы; все эле-

менты изделия работают одновременно; интенсивности отказов элементов берутся для периода нормальной работы, т. е.  $\lambda_i(t) = \text{const}$ . Интенсивности отказов элементов каждого типа берутся по соответствующим таблицам из справочников по надежности. Таким образом, ориентировочный расчет надежности позволяет определить рациональный состав элементов в изделии и наметить пути повышения надежности.

Окончательный расчет проводится на этапе технического проектирования и учитывает влияние на характеристики надежности режимов работы элементов в схеме и конкретные условия эксплуатации изделия. В общем случае интенсивности отказов элементов зависят от электрического режима работы элемента в схеме, температуры окружающей среды, механических воздействий в виде вибраций и ударов, влажности воздуха, давления, радиации и ряда других возможных факторов. Электрический режим работы элементов при расчетах надежности учитывают с помощью коэффициента нагрузки  $K_n$ . Известно, что интенсивность отказов резисторов увеличивается с увеличением мощности рассеяния резистора, а интенсивность отказов конденсаторов увеличивается с увеличением рабочего напряжения, приложенного к его обкладкам. Например, если резистор по расчету имеет мощность рассеяния 1 Вт, а в схеме используется резистор с номинальной мощностью рассеяния 2 Вт, то коэффициент нагрузки резистора в схеме

$$K_n = P_{\text{расч}}/P_{\text{сх}} = 1/2 = 0,5,$$

где  $P_{\text{расч}}$  — расчетная мощность рассеяния резистора;  $P_{\text{сх}}$  — мощность рассеяния резистора, стоящего в схеме.

Для проведения окончательного расчета надежности необходимо иметь данные о коэффициентах нагрузки всех элементов схемы. Для этого при выпуске электрических принципиальных схем заполняются карты режимов работы элементов с указанием коэффициента нагрузки.

Необходимым условием получения наиболее точных характеристик надежности при окончательном расчете является знание зависимости интенсивности отказов элементов от воздействующих внешних факторов. Наиболее существенными внешними факторами являются температура окружающей среды, механические нагрузки, влажность и атмосферное давление. Влияние на величину ин-

тенсивности отказов каждого из указанных факторов учитывается при расчетах надежности с помощью поправочных коэффициентов  $\alpha$  и  $K$ .

Поправочный коэффициент

$$\alpha = \lambda_1/\lambda_0, \quad (3.14)$$

где  $\lambda_1$  — интенсивность отказов данного элемента при конкретном воздействующем факторе и прочих номинальных условиях;  $\lambda_0$  — номинальная интенсивность отказов данного элемента, под которой понимается интенсивность отказов элементов в нормальных условиях эксплуатации при отсутствии механических перегрузок и в номинальном электрическом режиме ( $K_n=1$ ). Тогда интенсивность отказов элементов при эксплуатации в реальных условиях определяется как произведение номинальной интенсивности отказов на поправочные коэффициенты. Поправочный коэффициент  $\alpha$  учитывает влияние на надежность окружающей температуры и электрической нагрузки, а поправочные коэффициенты  $K$  учитывают механические воздействия, влажность, давление. Значения номинальных интенсивностей отказов основных элементов РЭА и коэффициентов  $K$  помещены в справочники по надежности в виде таблиц.

Поправочные коэффициенты  $\alpha$  определяются по справочным данным, которые приводятся или в виде таблиц, или в виде графиков зависимости:

$$\alpha = f(K_n, t),$$

где  $t$  — температура окружающей среды, °С;  $K_n$  — коэффициент нагрузки элементов. Графики зависимости поправочного коэффициента  $\alpha$  от температуры окружающей среды и коэффициента нагрузки приведены на рис. 3.2 и 3.3 [8]. Из графиков видно, что если снизить коэффициент нагрузки, то значение поправочного коэффициента снижается, т. е. за счет облегчения режима работы элемента в схеме можно повысить надежность этих элементов, а следовательно, и улучшить характеристики надежности изделия.

При расчете характеристик надежности все изделия расчленяются на приборы, приборы на блоки, блоки на крупные узлы, крупные узлы на более мелкие узлы и т. д. При этом расчет производится последовательно от простого к сложному. Схему расчета надежности удобно



составить таким образом, чтобы элементами расчета были конструктивно оформленные узлы или блоки. Окончательный расчет надежности складывается из следующих этапов: определение типа элементов и их характеристик; выбор метода расчета с последующим подбором определенных номограмм, таблиц, графиков или поправочных коэффициентов; определение электрических нагрузок и влияния внешней среды на каждый элемент; определе-

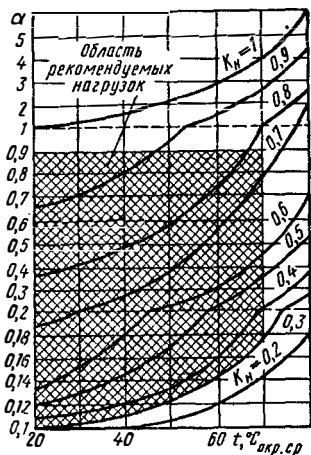


Рис. 3.2. Зависимость  $\alpha$  от  $t_{окр}$  и  $K_n$  для конденсаторов слюдяных типов КСОТ, КСО

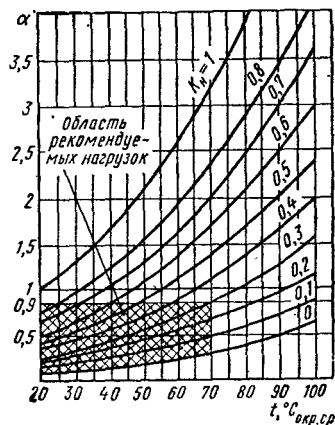


Рис. 3.3. Зависимость  $\alpha$  от  $t_{окр}$  и  $K_n$  для германиевых транзисторов

ние по соответствующим таблицам интенсивности отказов каждого элемента; суммирование всех интенсивностей отказов с учетом количества элементов каждого типа для определения интенсивности отказов всего изделия; расчет количественных характеристик надежности изделия. Данные расчетов заносятся в итоговые таблицы или приводятся в виде графиков. Оформляется технический отчет по расчету надежности.

### § 3.4. Общие и специальные методы повышения надежности

Наиболее жесткие требования по надежности предъявляются к космической РЭА и РЭА специального назначения. При этом необходимо еще учитывать, что указан-

ные категории аппаратуры подвергаются сложным климатическим и механическим воздействиям. Для таких категорий аппаратуры высокие требования по надежности не могут быть обеспечены только за счет общих мер повышения надежности. К общим мерам по обеспечению заданной высокой надежности относятся: 1) четкая регламентация условий эксплуатации изделия; 2) оптимальный выбор функциональной схемы изделия; 3) выбор для изделия комплектующих элементов, обладающих высокой надежностью и стабильностью характеристик, проведение схемных и конструкторских мероприятий, обеспечивающих щадящие режимы работы элементов в устройстве; 4) реализация технологических мероприятий, обеспечивающих бездефектное изготовление устройств; 5) проведение всесторонних конструкторских отбраковочных испытаний макетов и опытных образцов устройств, обеспечивающих наиболее полное выявление и устранение слабых мест схемы и конструкции еще на этапе разработки; 6) создание системы всесторонних производственных испытаний, обеспечивающей выявление производственных дефектов аппаратуры и ее элементов; 7) создание системы наблюдения за качеством работы устройств в эксплуатации, проведение профилактических мер и т. д.

Специальные методы повышения надежности связаны с введением в схему дополнительных элементов, предназначенных для повышения надежности устройства.

В теории надежности, прежде чем провести анализ радиотехнического устройства на надежность, принято переходить от электрической принципиальной схемы устройства к эквивалентной структурной схеме надежности. В основу такого перехода положены принятые в теории надежности понятия последовательного, параллельного и смешанного вида соединения элементов, которые не следует путать с аналогичными видами электрических соединений. Виды соединений в теории надежности показаны на рис. 3.4.

Последовательным, или основным, называется такое соединение элементов системы, при котором отказ хотя бы одного из элементов приводит к отказу системы в целом (рис. 3.4, а). Параллельным, или резервным, соединением элементов называют такое соединение, при котором отказ системы наступает лишь в случае отказа всех ее элементов (рис. 3.4, б). Смешанным соединением элементов называют соче-



тание основного и резервного видов соединений или более сложные структуры (рис. 3.4, в).

Наиболее эффективными мерами повышения надежности на этапе проектирования является применение резервирования. *Резервирование* — это метод повышения надежности путем введения запасных (резервных) элементов, являющихся избыточными по отношению к функциональной структуре РЭА, необходимой для выполнения заданных функций. Аппаратуру с избыточными элементами называют резервированной. В резервированном изделии отказ наступает тогда, когда выйдут из строя основное и все резервные устройства. Применяемые в теории надежности способы резервирования показаны на рис. 3.5.

Основным параметром резервирования является кратность резервирования. Под кратностью резервирования понимается отношение числа резервных изделий к числу основных (резервируемых). Кратность резервирования обозначается  $m$ . Различают резервирование с целой и дробной кратностью. Например, если  $m=3$ , то это означает, что число резервных устройств равно трем, основное устройство одно, а общее число устройств равно четырем. Это резервирование с целой кратностью. Если  $m=4/2$ , то это означает резервирование с дробной кратностью, при котором число резервных устройств равно двум, число основных — двум, а общее число устройств — шести (сократить дробь нельзя, так как если  $m=4/2=2$ , то это резервирование с целой кратностью, при котором число резервных устройств два, основное одно, а общее число устройств три).

В зависимости от масштаба и принятой единицы резервирования различают общий и отдельный способы резервирования. При общем резервировании резервируется вся система в целом. Общее резервирование в зависимости от способа включения резервных устройств можно разделить на постоянное резервирование и резервирование замещением.

При общем постоянном резервировании резервные устройства подключены к основным в течение всего времени работы и находятся в одинаковом с ними режиме. Схема общего постоянного резервирования показана на рис. 3.6. При общем постоянном резервировании может использоваться только нагруженный резерв, что требует полного состава запасных элементов, ведет к увеличению габаритов и массы системы и повышенному расходу энер-

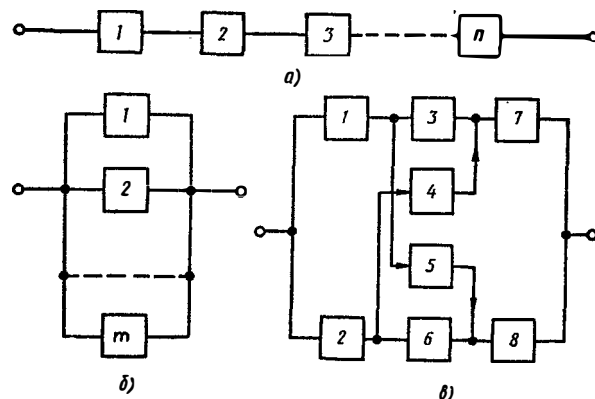


Рис. 3.4. Виды соединений в теории надежности: а — основное; б — резервное; в — смешанное

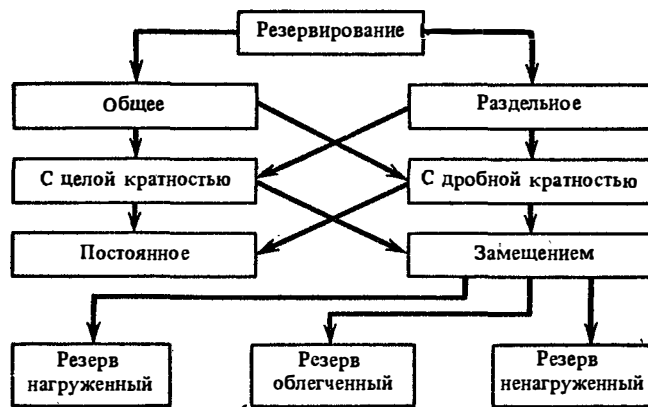


Рис. 3.5. Способы резервирования

гии. Кроме того, резервные элементы в этом случае «стареют» в такой же степени, как и основные рабочие элементы. Указанные факторы несомненно относятся к недостаткам данного вида резервирования. Основные характеристики надежности при общем постоянном резервировании с целой кратностью можно рассчитать по формулам:

$$P(t)_p = 1 - [1 - P(t)]^{m+1}, \quad (3.15)$$

где  $P(t)_p$  — вероятность безотказной работы резервированной системы;  $P(t) = e^{-\lambda t}$  — вероятность безотказной работы нерезервированной системы при экспоненциальном законе распределения надежности;  $m$  — кратность резервирования;

$$T_{ср p} = T_{ср} \sum_{i=0}^m \frac{1}{i+1} = T_{ср} \left( 1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{m+1} \right), \quad (3.16)$$

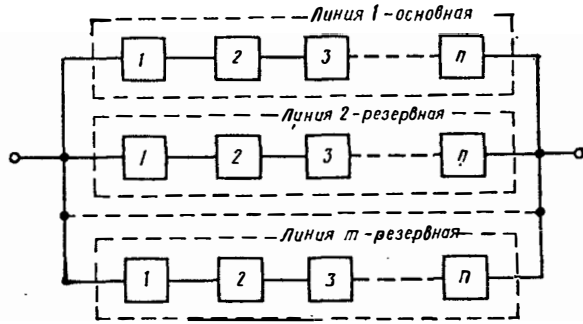


Рис. 3.6. Структурная схема общего постоянного резервирования

где  $T_{ср p}$  — средняя наработка на отказ резервированной системы;  $T_{ср}$  — средняя наработка на отказ нерезервированной системы.

Для наиболее простого случая, когда  $m=1$ , получим

$$P(t)_p = 1 - [1 - P(t)]^2; \quad (3.17)$$

$$T_{ср p} = 1,5 T_{ср}. \quad (3.18)$$

Таким образом, при одном основном и одном резервном устройстве средняя наработка на отказ увеличивается в 1,5 раза. К преимуществам общего постоянного резервирования относятся: относительная простота построения схем; отсутствие хотя бы кратковременного перерыва в работе при отказе одного или даже нескольких элементов системы; отсутствие дополнительных подключающих элементов, снижающих общую надежность системы.

При резервировании замещением резервные изделия заменяют основные только после их отказа. Схема об-

щего резервирования замещением показана на рис. 3.7. При включении резерва по способу замещения резервные элементы до момента их включения в работу могут находиться в различных состояниях. Исходя из возможных режимов работы резервных элементов, различают резервы: нагруженный, облегченный, ненагруженный.

При резервировании замещением резервное устройство включается в работающую систему с помощью автоматических устройств или вручную. При автоматическом включении требуется чрезвычайно высокая надежность

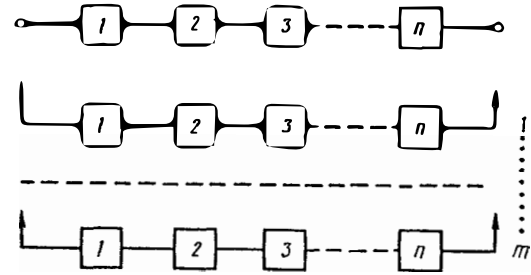


Рис. 3.7. Структурная схема общего резервирования замещением с целой кратностью

переключающих элементов. При большом количестве и невысокой надежности этих дополнительных элементов, входящих в резервированную систему, ее надежность может понизиться по сравнению с надежностью нерезервированной системы. Кроме того, даже при высокой степени быстродействия переключающих элементов имеется перерыв в работе системы на время переключения на резервные устройства. Следует заметить, что при ручной замене отказавших элементов возрастает время переключения, но надежность оператора, выполняющего функции переключающего устройства, может быть принята за единицу.

При использовании нагруженного резерва запасные резервные элементы находятся в том же режиме работы, что и основной элемент, независимо от того, участвуют они в работе схемы или нет. Если при этом основной и резервные элементы идентичны, то интенсивности их отказов совпадают и надежность основного и резервных устройств одинакова. При использовании нагруженного резерва, если не учитывать надежность автоматиче-

ских переключающих устройств, характеристики надежности можно рассчитать по тем же формулам, что и для общего постоянного резервирования.

При использовании ненагруженного резерва запасные резервные элементы до момента включения их в работающую схему полностью обесточены. В этом случае резервные устройства имеют самую высокую надежность по сравнению с основными элементами, поэтому общее резервирование замещением с использованием ненагруженного резерва обеспечивает наилучшие показатели надежности для общего резервирования. Характеристики надежности в этом случае рассчитывают по формулам:

$$P(t)_p = P(t) \sum_{i=0}^m \left( \frac{t_p}{T_{cp}} \right)^i \frac{1}{i!} =$$

$$= P(t) \left[ 1 + \frac{t_p}{T_{cp}} + \frac{1}{2!} \left( \frac{t_p}{T_{cp}} \right)^2 + \dots + \frac{1}{m!} \left( \frac{t_p}{T_{cp}} \right)^m \right]; \quad (3.19)$$

$$T_{cp\ p} = T_{cp} (m + 1), \quad (3.20)$$

где  $P(t)_p$  и  $P(t)$  — вероятность безотказной работы резервированной и нерезервированной систем;  $t_p$  — рабочее время системы;  $T_{cp\ p}$  и  $T_{cp}$  — средняя наработка на отказ резервированной и нерезервированной систем;  $m$  — кратность резервирования.

Для наиболее простого случая, когда  $m=1$ , получим

$$P(t)_p = P(t) (1 + t_p/T_{cp}); \quad (3.21)$$

$$T_{cp\ p} = 2T_{cp}. \quad (3.22)$$

Таким образом, при использовании ненагруженного резерва средняя наработка на отказ увеличивается как минимум в два раза.

При использовании облегченного резерва резервные элементы до момента их включения в работающую схему находятся в облегченном электрическом режиме. Например, для полупроводниковых схем облегченный режим обеспечивается за счет пониженного напряжения на коллекторах транзисторов по сравнению с номинальным рабочим режимом. Надежность каждого резервного

элемента в этом случае выше надежности соответствующего основного элемента.

Показатели надежности при использовании облегченного резерва занимают среднее положение, т. е.  $T_{cp\ p\ ненагр} > T_{cp\ p\ обл} > T_{cp\ p\ нагруж}$ .

Использование облегченного или ненагруженного резерва дает возможность снизить расход электроэнергии и увеличить надежность аппаратуры, так как надежность резервных устройств в этом случае всегда выше, чем основных. Следовательно, резервирование замещением позволяет улучшить показатели надежности и продлить срок службы РЭА. Однако не следует забывать о недостатках, основным из которых является наличие переключающих устройств, имеющих свои показатели надежности и обладающих определенной инерционностью, что приводит к появлению конечного времени переключения с основного блока на резервные, а в некоторых видах РЭА это недопустимо. Поэтому резервирование замещением применяется для систем, допускающих перерывы в работе. Кроме того, при нагружении и облегченном резервах увеличиваются потребляемые мощности.

При раздельном резервировании резервируются отдельные составные части изделия, т. е. вводится индивидуальный резерв для каждого элемента, узла, блока избыточной системы. Раздельное резервирование бывает общим и замещением. Схемы раздельного резервирования показаны на рис. 3.8. Раздельное резервирование может быть поэлементным, покаскадным, узловым, блочным и т. д. и используется в сложных системах, в которых требуемые показатели надежности не удастся получить рассмотренными выше способами резервирования. При раздельном резервировании отказ системы может произойти только тогда, когда отказ произойдет дважды подряд в одном и том же устройстве ( $m=1$ ), что маловероятно. Поэтому показатели надежности при раздельном резервировании значительно выше. Для оценки надежности при раздельном резервировании используется специфический и сложный математический аппарат. Математический анализ таких систем показывает, что наиболее высокие показатели надежности можно получить, используя раздельное резервирование замещением с ненагруженным резервом.

Эффективность резервирования принято оценивать с помощью коэффициента повышения надежности  $\gamma$ . Ко-

Эффект повышения надежности определяют по показателям безотказности из соотношений:

$$\gamma_p = P(t)_p / P(t); \quad (3.23)$$

$$\gamma_Q = Q(t) / Q(t)_p, \quad (3.24)$$

где  $P(t)_p$ ,  $Q(t)_p$  и  $P(t)$ ,  $Q(t)$  — вероятность безотказной работы и вероятность отказа для резервированной и нерезервированной систем. Следует заметить, что незави-

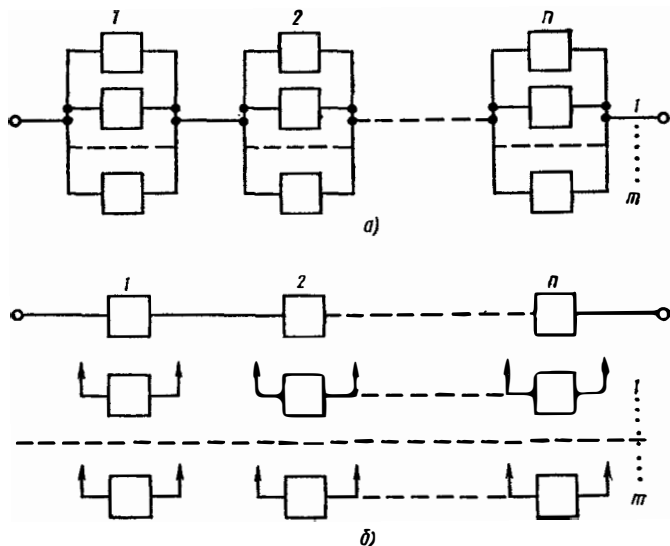


Рис. 3.8. Структурная схема отдельного резервирования: а — отдельное постоянное с целой кратностью; б — отдельное замещением с целой кратностью

симо от выбора способа резервирования РЭА введение резерва всегда влечет за собой резкое возрастание габаритов, массы и стоимости аппаратуры, а в отдельных случаях и потребления мощности, поэтому использовать резервирование необходимо в технически и экономически обоснованных случаях. Целесообразность применения резервирования определяется следующими факторами: исходным уровнем надежности комплектующих изделий; заданным временем эксплуатации; наличием эффективной системы контроля и периодичностью профилактики; возможностями использования других, менее избыточных методов повышения надежности.

Анализ резервированных систем показывает, что интенсивность отказов резервированной системы быстро возрастает с течением времени, хотя интенсивность отказов нерезервированной системы от времени не зависит, что показано на рис. 3.9 [1] для общего и отдельного резервирования. Из графика следует, что для ряда резервированных систем существует такой момент времени  $t_{кр}$ , после которого использование резервированной системы не оправдано. Поэтому если не учитывать особенности профилактики систем, то резервирование более выгодно применять для систем кратковременного действия, когда  $t \ll t_{кр}$ , тогда как для систем длительного использования, когда  $t \gg t_{кр}$ , целесообразно использовать другие методы повышения надежности.

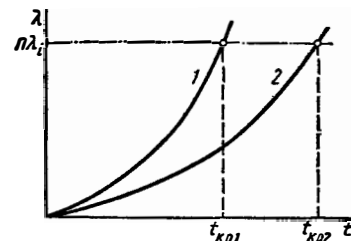


Рис. 3.9. Зависимость интенсивности отказов резервированной системы от времени: 1 — общее резервирование; 2 — отдельное резервирование

Выбор метода повышения надежности и выбор конкретного способа резервирования в значительной степени определяются категорией РЭА. Например, для современных сложных вычислительных комплексов, насчитывающих сотни и тысячи узлов и блоков, использование резервирования замещением может привести к простоям машины, необходимости повторения программ, что снижает оперативность решения задачи. Поэтому вытекает необходимость использования постоянного резервирования или разумного сочетания постоянного резервирования с резервированием замещением. Методы резервирования, эффективные для цифровых устройств, могут оказаться малопригодными для устройств аналогового типа. Для аналоговых устройств чаще может использоваться резервирование замещением, что объясняется отсутствием взаимного влияния основного и резервного каналов. Таким образом, разнообразие существующих категорий РЭА затрудняет построение общих конструктивных подходов и единых требований по надежности. Поэтому выбор показателей, принятие решения о введении различных методов, повышающих надежность, делают дифференцированно в зависимости от категории проектируемой аппаратуры.

### § 3.5. Особенности обеспечения надежности микроэлектронной аппаратуры

Основу современной микроэлектронной аппаратуры составляют ИМС различной степени интеграции. С переходом на микроэлектронную элементную базу изменяется традиционный подход к проблеме обеспечения надежности, характерный для РЭА предшествующих поколений. К проблеме обеспечения надежности микроэлектронной аппаратуры принят физический подход, суть которого заключается в создании системы управления качеством ИМС и аппаратуры в целом. Система основывается на ускоренном выявлении потенциально дефектных или ненадежных экземпляров ИМС, изучении физических механизмов и процессов, приводящих к отказам аппаратуры и комплектующих ее ИМС, соотношения дефектов в ИМС со структурой и особенностями базовых циклов изготовления, контроля и использования ИМС. В РЭА предшествующих поколений компонентами надежности были реальные физические объекты — транзисторы, диоды, лампы, резисторы, конденсаторы и т. д., а вся аппаратура моделировалась в виде совокупности больших количеств разнородных комплектующих изделий. При физическом подходе информацию о свойствах компонентов ненадежности получают статистической обработкой данных об отказах ИМС разных типов с разной схемотехникой, но реализованных одинаковыми конструктивными и технологическими способами. Полученная информация о дефектах обрабатывается и в действие включается надежная обратная связь, заключающаяся в воздействии на основные компоненты ненадежности путем усовершенствований, вносимых в процессы проектирования, изготовления, контроля и исследования ИМС и аппаратуры в целом.

Можно выделить основные типы отказов ИМС. Для полупроводниковых ИМС характерны отказы, связанные с физическими процессами внутри полупроводникового кристалла, с явлениями на поверхности кристалла, а также внутренними и внешними дефектами контактов. Для гибридных ИМС, использующих тонкопленочную технологию, характерны отказы, зависящие от надежности навесных активных и пассивных элементов, а также отказы, вызванные нарушениями в контактах и контактных площадках. Для всех ИМС характерны отказы, вызванные нарушением механической целостности и герметичности корпусов ИМС.

Одним из средств повышения надежности можно считать испытания ИМС. В настоящее время разработаны обширные программы испытаний, которые можно разделить на три вида: а) входной контроль; б) отбраковочные испытания; в) ускоренные испытания.

*Входной контроль* ИМС служит для проверки соответствия нормам технических требований. Входной контроль проводят в эксплуатационных условиях и режимах, которые оговорены в документации на ИМС. Испытания, которые проводятся при входном контроле, организуют так, чтобы обеспечить возможность рекламаций заводу-изготовителю.

*Отбраковочные* испытания в отличие от входного контроля обычно не связаны с рекламацией и поэтому являются более жесткой процедурой. Отбраковочным испытаниям могут подвергаться все ИМС перед их установкой в специальную аппаратуру. Цель отбраковочных испытаний — стимулировать отказы ИМС, имеющих скрытые технологические дефекты, не понизив при этом ресурса надежности остальных ИМС. Таким образом, отбраковочные испытания являются неразрушающим контролем для годных ИМС и разрушающим контролем для потенциально ненадежных. Эти испытания можно считать одним из звеньев системы управления качеством аппаратуры.

*Ускоренные* испытания в отличие от отбраковочных являются выборочными и разрушающими. Ускоренные испытания проводятся для оценки надежности при форсированном действии тех факторов, которые ускоряют протекание процессов отказов. Основными такими факторами являются температура, влажность и электрические нагрузки.

Одним из направлений повышения надежности ИМС является применение постоянного резервирования внутри ИМС. Использование этого направления характерно для цифровых интегральных микросхем. Например, микросхемы серий К104, К106, К114 и другие включают резервные логические элементы; серия К205 представляет собой резервированные логические элементы.

Не менее важным звеном в обеспечении надежности современной РЭА является тщательный анализ отказов. Отказавшие ИМС представляют большую ценность для выявления причин отказов, а результаты анализа отказавших ИМС строго фиксируются. Современные ИМС имеют интенсивность отказов  $10^{-7}$ — $10^{-8}$  1/ч. Правиль-

ная классификация экспериментальных данных о компонентах ненадежности ИМС позволит эффективно прогнозировать надежность РЭА новых поколений.

## ГЛАВА 4

### КОМПОНОВКА РЭА

#### § 4.1. Основные принципы компоновки

Наиболее сложной и ответственной задачей при конструировании РЭА является компоновка разрабатываемого изделия. Компоновка радиотехнического изделия — это размещение на плоскости или в пространстве различных элементов изделия. Такими элементами могут быть радиодетали (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности и т. п.), функциональные узлы различного конструктивного исполнения (модули, интегральные микросхемы, микросборки и т. п.), блоки и приборы. В результате компоновки должны быть определены геометрические размеры, форма, ориентировочная масса изделия и взаимное расположение всех элементов в конструкции.

Компоновка проводится по электрической принципиальной схеме изделия. Имея эту схему, конструктор должен создать модель конструкции изделия, учитывая большое количество различных факторов и требования технического задания на разработку изделия. Компоновка — наиболее сложная работа при конструировании и требует от конструктора не только большого опыта и знаний, но и творческого подхода к решению задач компоновки. Конструктору необходимо рассмотреть несколько вариантов компоновки и выбрать оптимальный вариант, при выборе которого необходимо учитывать условия производства и эксплуатации изделия. От качества компоновки в значительной степени зависят технические и эксплуатационные характеристики изделия, ремонтпригодность и надежность изделия.

При разработке компоновки радиотехнического изделия приходится учитывать сложную совокупность факторов, связанных с особенностями функционирования и эксплуатации изделия, электрическими взаимосвязями и тепловыми режимами внутри РЭА, геометрическими размерами и формой отдельных элементов конструкции. Все эти факторы учитываются при «внутренней» компоновке изделия. Иногда вместо термина «внутренняя» использу-

ют термин «функциональная» компоновка. Если аппаратура обслуживается человеком-оператором, то возникает необходимость учитывать дополнительные факторы, определяющие «внешнюю» компоновку изделия, которая производится с учетом требований инженерной психологии и технической эстетики. В РЭА существует слабая связь между внутренней и внешней компоновкой, поэтому внутренняя и внешняя компоновки рассматриваются как отдельные стороны конструирования.

#### § 4.2. Внутренняя компоновка изделий

При *внутренней* компоновке необходимо удовлетворить основные требования: 1) между отдельными элементами, узлами, блоками, приборами должны отсутствовать паразитные электрические взаимосвязи, которые могут существенно изменить характер полезных взаимосвязей и нарушить нормальное функционирование изделия; 2) тепловые поля, возникающие в РЭА вследствие перегрева отдельных элементов, не должны ухудшать технические характеристики аппаратуры; 3) необходимо обеспечить легкий доступ к деталям, узлам, блокам в конструкции для контроля, ремонта и обслуживания. Расположение элементов конструкции должно также обеспечивать технологичность монтажа и сборки с учетом использования автоматизации этих процессов; 4) габариты и масса изделия должны быть минимально возможными.

Паразитные обратные связи определяются взаимным расположением отдельных частей конструкции и соединяющих их проводников и могут возникать не только между отдельными элементами, но и между узлами, блоками, приборами, что нарушает устойчивость работы любой радиотехнической схемы.

Все виды паразитных связей принято делить на электромагнитные, электростатические и кондуктивные. Электромагнитные связи возникают при протекании тока по катушкам индуктивности и проводникам; электростатические создаются за счет разности потенциалов между различными точками корпуса или за счет паразитных емкостей; кондуктивные возникают в тех случаях, когда есть общая нагрузка для полезного и паразитного сигналов, т. е. когда нагрузка является общей для нескольких электрических цепей. Чаще всего такими общими участками являются проводники питания, «земля-

ные» проводники, внутренние сопротивления источника питания, общие участки корпуса.

Для устранения паразитных обратных связей прежде всего необходимо рациональное размещение элементов в конструкции. Однако этого иногда недостаточно и приходится применять различные конструктивные меры, наиболее распространенными из которых могут быть следующие: связанные по схеме каскады следует располагать в конструкции в непосредственной близости друг от друга для уменьшения длины соединительных проводников; каждый элемент схемы или узел, подверженный опасности возникновения паразитных взаимосвязей, должен иметь только одно соединение с шиной заземления; если узлы конструкции находятся в отдельных корпусах и соединяются между собой проводниками, то провода должны быть экранированные и объединяться в один жгут (кроме цепей питания); при компоновке усилительных устройств желательно располагать каскады по одной линии, максимально удаляя входные каскады от выходных. Особенно важно выполнять это требование на частотах выше 10 МГц; количество соединительных проводников и их длина должны быть минимальными. Особое внимание на длину соединительных проводников следует обращать при компоновке высокочастотных устройств.

Если конструктивные меры не дают возможности уменьшить паразитные обратные связи до допустимого уровня, то можно применять экраны.

Для защиты объемных проводников от паразитных взаимосвязей используют экранированные провода, однако на высоких частотах они обладают достаточно большой емкостью (до 200 пФ/м). Необходимо учитывать, что при использовании экранированных проводов масса конструкции возрастает, а жгут из экранированных проводов занимает больший объем, поэтому применение этих проводов должно быть технически обоснованным.

На создание варианта компоновки с минимально возможными паразитными взаимосвязями следует обращать серьезное внимание, так как если такие взаимосвязи обнаруживаются в уже изготовленном устройстве, то устранить их очень сложно. Иногда требуется значительная перекомпоновка конструкции, что приводит к срыву сроков разработки и дополнительным материальным затратам.

Необходимость ограничивать в РЭА тепловые поля ставит перед конструктором сложные задачи. Радиоэлек-

тронная аппаратура при работе постоянно излучает тепловую энергию. Для большинства категорий РЭА только несколько процентов подводимой мощности расходуется на полезное преобразование сигнала, а остальная энергия превращается в тепловую. При компоновке необходимо учесть возможность взаимного влияния тепловых полей отдельных элементов аппаратуры, выяснить возможность обеспечения нормального теплового режима устройства и только после этого решать вопрос о необходимости использования специальных систем охлаждения.

Перед тем как приступить к компоновке узла или блока, определяется степень тепловой нагрузки всех входящих элементов. В РЭА одни элементы являются источниками тепловых излучений (например, резисторы, лампы), а другие весьма чувствительны к повышению температуры (например, германиевые полупроводниковые приборы). Характеристики теплочувствительных элементов значительно ухудшаются при повышении температуры и при этом падает их надежность. Естественно, что такие элементы надо располагать дальше друг от друга. Оптимальным вариантом компоновки был бы такой вариант, при котором теплочувствительные элементы и источники теплового излучения расположить в разных узлах или блоках, а если это невозможно, то надежно изолировать друг от друга.

По тепловому режиму узлы и блоки РЭА делят на теплонагруженные и нетеплонагруженные. Теплонагруженность радиоэлектронного устройства характеризуется плотностью теплового потока в данном устройстве. Под плотностью теплового потока понимается тепловой поток, проходящий через единицу поверхности.

Аппаратура считается нетеплонагруженной, если плотность теплового потока в ней не превышает  $0,5 \text{ мВт/см}^2$ . При этом перегрев поверхности устройства относительно окружающей среды не превышает  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

При значениях плотности теплового потока больше  $0,5 \text{ мВт/см}^2$  аппаратура считается теплонагруженной и требует использования специальных систем охлаждения.

Современная РЭА, выполняемая на микроэлектронной элементной базе, имеет напряженный тепловой режим, напряженность которого имеет тенденцию увеличиваться с увеличением степени интеграции элементной базы.

При уменьшенных габаритах современной РЭА объем специальных систем охлаждения может быть соизмерим



с объемом РЭА. Даже применение схем термокомпенсации усложняет конструкцию, ухудшает надежность и увеличивает массу и объем аппаратуры, поэтому важность обеспечения нормального теплового режима на этапе компоновки очевидна.

Проводя компоновку радиотехнического устройства, необходимо обеспечить все возможные меры для удобства изготовления и эксплуатации аппаратуры. Эти требования учитываются в основном выбором типа конструкции узла или блока, обеспечивающего высокую ремонтопригодность и взаимозаменяемость в конструкции, и были рассмотрены в § 1.3. Вопросы обеспечения технологичности монтажа и сборки конструктор должен решать совместно с технологами.

Требование уменьшения массы и габаритов современной РЭА, особенно специальной, является исключительно важным в связи с большой функциональной сложностью аппаратуры. Однако возможности уменьшения габаритов конструкции тесно связаны с рассмотренными требованиями компоновки. Совершенно очевидно, что с уменьшением габаритов узла, блока и прибора увеличивается плотность заполнения объема конструкции, что увеличивает вероятность возникновения в конструкции паразитных взаимосвязей, ухудшает тепловой режим и технологичность монтажа и сборки, усложняет доступ к отдельным элементам, узлам для контроля и обслуживания.

Основная задача конструктора при компоновке — найти такое компромиссное решение, при котором в наибольшей мере можно удовлетворить всем рассмотренным выше основным требованиям.

### § 4.3. Конструктивная иерархия и основные направления конструирования РЭА

Любая РЭА имеет законченную конструкцию, представляющую собой сложную композицию, составленную из большого числа конструктивных единиц. Такая композиция создается человеком с учетом большого количества требований, предъявляемых к каждой конкретной категории аппаратуры.

Конструкцию современной РЭА следует рассматривать как некоторое структурное образование, отдельные части которого находятся в иерархической соподчиненности, что подразумевает усложнение конструкции после-

довательным объединением более простых конструктивно законченных единиц (отдельных дискретных элементов, интегральных микросхем, модулей) в более сложные.

Если по уровням функциональной сложности РЭА можно разделить на радиотехническую систему или комплекс, радиоустройство, блок, субблок или функциональный узел, то такое деление возможно и по ее конструктивным уровням.

По сложности уровня компоновки конструкции подразделяют на системы, многоблочные монтажные устройства (стойки, шкафы, стеллажи, рамы), блоки, функциональные ячейки и элементный базис. Таким образом, можно говорить о существовании пяти структурных уровней компоновки: нулевой, I, II, III, IV.

Самый низкий структурный уровень — *нулевой* называют элементарным базисом РЭА. Элементарный базис РЭА составляют все конструктивно неделимые радиоэлементы общего применения: резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, линии задержки, полупроводниковые и электронные приборы, интегральные микросхемы (ИМС) и компоненты и т. д. Одни элементы нулевого уровня, чтобы иметь какой-либо функциональный признак, объединяют в схемные сочетания (резисторы, конденсаторы и т. п.), а другие (например, интегральные схемы) уже имеют функциональный признак.

*I структурный уровень* — функциональная ячейка (ФЯ), на общем несущем основании которой компонуются элементы нулевого уровня и элементы коммутации и контроля. В качестве несущих оснований функциональных ячеек чаще всего применяются печатные платы, металлоческие рамки и листы. Названиями функциональная ячейка заменены названия I уровня конструкции — модуль, субблок, ТЭЗ и т. д. ФЯ, как правило, является функционально и конструктивно завершенной сборочной единицей: у нее есть свои выходы, присоединительные и кодовые элементы, маркировочная планка, контрольные гнезда и т. д. В общем случае ФЯ состоит из одной платы, но при необходимости может иметь две.

*II структурный уровень* — это блоки, компоновка которых осуществляется путем сборки ФЯ в пакеты и корпусирование пакетов в блоки. Название блок заменяет существующие названия II структурного уровня — прибор, контейнер и др. В блоке содержится от одной до десятков ФЯ, он обязательно является конструктивно и



функционально законченным изделием со всей текстовой документацией.

*III структурный уровень* составляют монтажные устройства, в которых блоки komponуются в общем несущем основании. Таким основанием для бортовой РЭА может служить общая амортизационная рама или стеллаж, для стационарной — шкафы, стойки и пульты. В соответствии с компоновкой монтажное устройство может иметь несколько частных названий — индивидуальная и групповая рамы, стеллаж (открытый со всех сторон шкаф), стойка (шкаф без двери и без своей лицевой панели), шкаф (когда есть двери и своя лицевая панель), пульт и др.

Монтажное устройство имеет полное функциональное и конструктивное завершение и служит для электрического объединения нескольких блоков и для сопряжения их с несколькими носителями. При этом конструктивно, как правило, два размера монтажного устройства — габариты и высота — являются постоянными.

*IV структурный уровень* составляет система, которая служит для объединения ряда монтажных устройств на объекте. Монтажные устройства могут быть разбросаны по разным помещениям или отсекам и к тому же конструктивно чаще всего бывают различными: пульт, стойка, рама, прибор.

Может быть другое деление на уровни, включающее в себя меньшее или большее количество структурных уровней конструкции.

Появление дополнительных структурных уровней (например, модули) ведет к увеличению связей, переключений и ухудшает надежность и технологичность конструкции. Сокращение структурных уровней конструкции, наоборот, ведет к лучшему заполнению шкафов и уменьшению связей (например, минуя II структурный уровень, когда монтажное устройство в виде рам с монтажными панелями заполняется сразу функциональными ячейками, как это происходит в стационарных ЭВМ). Количество структурных уровней в конструировании кроме функциональной сложности устройства определяется элементарным базисом.

Элементарный базис в РЭА значительно изменился. Сначала элементарный базис составляли только дискретные схемные элементы, в том числе электронные лампы, на смену которым пришли полупроводниковые приборы. Затем появились полупроводниковые и гибридные ИМС.

Интегральная микросхема является неделимой конструктивной единицей, изготовленной групповыми технологическими методами, и, как правило, представляет собой не только конструктивно, но и функционально законченный узел. Поэтому в данном случае в элементарный базис оказались заложенными функциональные признаки, в то время как до появления ИМС эти признаки формировались в первом структурном уровне при объединении дискретных элементов в схемные сочетания. Например, для конструктивного выполнения схемы триггера транзисторы, резисторы и конденсаторы надо расположить на общем основании и выполнить электрический монтаж схемы. В таком исполнении триггер конструктивно представляет собой первый структурный уровень конструкции. Но если в качестве нулевого структурного уровня использовать ИМС, представляющую собой триггер, то в первый структурный уровень войдет более сложное устройство и количество структурных уровней в конструкции уменьшится.

С появлением ИМС элементарный базис стали характеризовать степенью интеграции. При этом различают элементную и функциональную интеграции. Под элементной понимают такое объединение дискретных компонентов в одном твердом теле, при котором каждому элементу соответствует определенный объем твердого тела, а под функциональной — объединение схемных функций элементов, при котором невозможно выделить тот или иной объем твердого тела, выполняющий функции какого-либо элемента.

Под степенью интеграции  $K$  понимается десятичный логарифм количества элементов  $N$ , объединенных на одном основании:  $K = \lg N$ . В ГОСТ 17021—75 различают ИМС по степени интеграции: 1-я — до 10 элементов, 2-я — от 10 до 100 элементов, 3-я — от 100 до 1000 элементов, 4-я — свыше 1000 элементов, 5-я — свыше 10 000 элементов.

Микросхемы 1—5-й степеней интеграции также соответственно называют: ИМС малого уровня интеграции (МИС) — для 1-й степени интеграции; ИМС среднего уровня интеграции (СИС) — для 2-й и 3-й степеней интеграции, большие интегральные схемы (БИС) — для 3-й и 4-й степеней интеграции, сверхбольшие интегральные схемы (СБИС) — для 5-й степени интеграции.

Увеличение степени интеграции ИМС дает возможность повышать качественные показатели и надежность

РЭА при меньших затратах. Повышение надежности РЭА достигается благодаря уменьшению числа технологических операций и внешних соединений. Снижение стоимости РЭА обуславливается уменьшением объема монтажно-сборочных работ.

Если элементный базис составляют конструктивно неделимые элементы, то остальные структурные уровни в конструкции всегда являются сборными, к ним относятся функциональные узлы, блоки, шкафы, рамы.

Деление конструкции на структурные уровни позволяет: снизить брак в производстве за счет увеличения степеней интеграции неделимых узлов; организовать параллельное изготовление различных узлов, что сокращает производственный цикл изделия и облегчает организацию контроля в процессе производства; обеспечить ремонтпригодность при эксплуатации.

Конструкция современной РЭА является прежде всего результатом эволюции элементного базиса, которая повлекла за собой изменение методов компоновки и характера структурных уровней в конструкции. При компоновке преследуется цель максимально использовать высокие качества элементной базы. С увеличением степеней интеграции уменьшается число монтажных соединений, увеличивается плотность компоновки, уменьшается масса и объем устройства. Все большее количество соединений переходит внутрь самой микросхемы, и сложность конструкции как бы переходит в сложность элементного базиса.

За период развития РЭА произошла смена трех поколений. Основными отличительными признаками поколения РЭА считаются элементный базис и метод конструирования: в первом поколении — электронная лампа, крупногабаритные навесные электрорадиоэлементы (ЭРЭ) и блочный метод конструирования; во второй — транзистор, миниатюрные ЭРЭ и модульный метод конструирования; в третьем — ИМС с небольшой степенью интеграции и функционально-узловой метод конструирования; в четвертом (современная аппаратура) — БИС и СБИС, функциональные компоненты и функционально-узловой метод конструирования с применением микросборок (МСБ).

Первое поколение РЭА характеризовалось мелкоблочной конструкцией с применением реле, электронных ламп и крупногабаритных элементов, не предназначенных для печатного монтажа. Компоновка осуществлялась на едином блочном шасси, где невозможно параллельное изготовление и применение средств автоматизации. Контактное соединение осуществлялось пайкой, монтаж — объемным проводом. Достигнутый уровень быстродействия составлял  $10^3$  опер/с.

Аппаратура второго поколения, выполненная на основе транзисторной техники и печатного монтажа, в конструктивном отношении

реализована модульным методом, при котором базовым схемным элементом стал функциональный узел (ФУ), что позволяло увеличить надежность, эксплуатационные характеристики аппаратуры, освоить серийный выпуск унифицированных ФУ. Процесс унификации и стандартизации параметрических рядов ФУ, их формы, габаритов и типов соединений привел к созданию конструкций в виде модулей различного типа (этажерочных, плоских, микромодуль), это открывало путь к параллельному изготовлению и проектированию. Конструкция мелко- и среднеблочная, контактирование пайкой, двусторонние печатные платы, но печать с малыми возможностями, а установка на печать разновысотных элементов (этажерочные модули и ЭРЭ) вела к большим потерям объема. Достигнутый уровень быстродействия составлял  $10^4$  опер/с.

Аппаратура третьего поколения выполняется на основе корпусированных полупроводниковых и гибридных ИМС малой и средней степеней интеграции, миниатюрных ЭРЭ и многослойных печатных плат, что позволяет уменьшать массогабаритные характеристики аппаратуры (при тех же функциональных задачах) и существенно повышать надежность РЭА. Конструкция среднеблочная с более высоким применением средств автоматизации и механизации при изготовлении и проектировании, многожильные кабели, контактирование пайкой, сваркой, накруткой. Достигнутый уровень быстродействия составляет  $10^6$  опер/с.

Аппаратура четвертого поколения в составе элементного базиса содержит БИС, СБИС, а также большие гибридные интегральные схемы (БГИС). По функциональной сложности БИС и БГИС могут соответствовать блоку в аппаратуре первого или второго поколения. Кроме того, аппаратура четвертого поколения в составе элементного базиса содержит микросборки. При этом микросхемы предназначены для широкого применения и выпускаются крупными сериями специализированными заводами-изготовителями ИМС, а МСБ (в основном гибридные) разрабатываются для конкретной РЭА, т. е. являются микросхемами частного применения. Микросборки, как и микросхемы, могут быть корпусированными и бескорпусными. Аппаратура четвертого поколения выполняется с большой долей отказа от дискретных элементов (в корпусах ИМС) на основе многослойных печатных и керамических плат, гибких печатных шлейфов. Автоматизированное проектирование занимает главенствующее положение вплоть до выпуска конструкторской документации. Контактное соединение ИМС сваркой, узлов — пайкой. Достигнутый уровень быстродействия составляет  $10^8$  опер/с.

Аппаратура пятого поколения будет строиться на основе крупных функциональных блоков с применением БИС, СБИС и узлов функциональной микроэлектроники: оптоэлектронные, акустоэлектронные и пр. Ожидаемый уровень быстродействия должен составить  $10^{12}$  опер/с.

Анализ современного состояния РЭА различного назначения, а также перспектив ее развития показывает, что с конструктивной точки зрения особенно важными являются следующие направления: традиционное — конструирование и компоновка РЭА с использованием корпусированных ИМС и МСБ на печатных платах; развивающееся — компоновка РЭА с использованием бескор-

пусных МСБ на металлических основаниях; перспективное — конструирование РЭА с использованием БИС и СБИС, в том числе матричных, в кристаллодержателях или на лентах-носителях на крупноформатных («гигантских») металлических подложках.

#### § 4.4. Критерии качества компоновки и конструкции

Основными компоновочными параметрами обычно считают объем, площадь и массу аппаратуры. Для определения качества компоновки необходимо рассматривать компоновочные параметры, пользуясь которыми можно оценивать как качество компоновки аппаратуры в целом, так и отдельных конструктивных частей. Качество компоновки тесно связано с качеством конструкции, но качество конструкции — понятие более широкое. Под качеством конструкции понимается совокупность технических, функциональных и экономических показателей, определяющих степень пригодности конструкции по заданному назначению. Качество конструкции характеризуется еще рядом дополнительных показателей, таких, как величина потребляемой мощности, собственная резонансная частота конструкции, степень герметичности конструкции, вероятность безотказной работы. С усложнением аппаратуры, изменением ее элементной базы менялись и критерии оценки качества компоновки и конструкции. Новые качества элементной базы использовались для уменьшения числа соединений устройств, уменьшения объема и массы устройства в целом. Для аппаратуры первых поколений сложность устройства характеризовалась количеством активных дискретных элементов. С переходом на микроэлектронную элементную базу показателем сложности стала степень интеграции. На этапе развития микроминиатюризации удобно было использовать коэффициент миниатюризации  $K_m$ , характеризующий долю узлов в миниатюрном исполнении:

$$K_m = \frac{N_2}{N_1 + N_2} 100\%,$$

где  $N_1$  — общее число элементов;  $N_2$  — число элементов в составе микросхем.

Основными компоновочными параметрами пользуются для оценки качества компоновки РЭА одного назначения и принципа действия, а также для сравнения раз-

личных вариантов компоновки одного и того же устройства.

Объем устройства

$$V = V_N + V_M + V_{HK},$$

где  $V_N$  — общий объем всех электрорадиоэлементов;  $V_M$  — объем всех соединений (монтажа);  $V_{HK}$  — объем несущей конструкции, обеспечивающий прочность и защиту конструкции. Если несущая конструкция не обеспечивает отвод теплоты, то к  $V_{HK}$  добавляется объем теплоотводящего устройства. Расчет по приведенной формуле дает возможность судить о соотношениях полезного объема ( $V_N$ ) и объемов, зависящих непосредственно от правильного выбора типа конструкции и компоновки ( $V_M$  и  $V_{HK}$ ). Можно отдельно оценить потери объема на несущие элементы конструкции с помощью коэффициента дезинтеграции:  $q = V/V_N$ . Коэффициент дезинтеграции показывает эффективность использования элементной базы в конструкции. Чем меньше коэффициент дезинтеграции, тем выше качество компоновки.

Показателем, характеризующим использование объема устройства или его площади (например, для печатной платы или пленочной микросхемы), может служить и плотность упаковки электрорадиоэлементов или компонентов ( $N$ ) в заданном объеме устройства ( $V$ ):

$$\lambda_v = N/V,$$

где  $\lambda_v$  — плотность упаковки в объеме, ед/см<sup>3</sup>, или на заданной площади ( $S$ ):

$$\lambda_s = N/S.$$

Под компонентами устройства понимаются неразъемные функционально и конструктивно законченные сборочные единицы, соответствующие определенной для них технологии (например, корпусированные интегральные микросхемы, микросборки и т. п.). Значения этих показателей непосредственно зависят от выбранной схемы компоновки, от используемой элементной базы, технологических возможностей производства и категории аппаратуры и технико-экономических требований к ней.

Важным параметром компоновки является масса устройства, зависящая от объема этого устройства и удельной массы  $m = Vm_v$ .

Значение удельной массы узла или блока определяется удельными массами компонентов, несущих конструкций, элементов соединений, теплопроводов и т. д. Удельная масса во многом зависит от соотношения массы компонентов и остальных элементов конструкции. Стремление уменьшить массу несущих конструкций, корпуса, теплопроводов ограничивается требованиями обеспечения тепловых режимов, прочности и жесткости конструкции, технологией изготовления.

При оценке объема и массы конструкций необходимо учитывать, что для ряда категорий аппаратуры (например, бортовой) эти показатели имеют одностороннее ограничение, т. е. объем и масса конструкции всегда должны быть меньше (или равны) объема и массы по техническому заданию.

При разработке конструкции и компоновки часто используется коэффициент плотности ( $\text{кг/дм}^3$ ):  $K = m/V$ .

Коэффициент плотности хорошо оценивает правильность выбора типа конструкции и компоновки, так как учитывает два основных параметра качества компоновки: объем и массу конструкции. Для оценки качества компоновки определенных структурных уровней конструкции рассчитывают плотность заполнения конструкции высшего структурного уровня конструктивными единицами низшего структурного уровня. Например, для блока, состоящего из отдельных узлов, плотность заполнения

$$\beta = V_1/V_2,$$

где  $V_1$  и  $V_2$  — объем узлов и блока.

Количественные показатели качества компоновки дают возможность выбрать оптимальный вариант конструкции и судить о развитии техники компоновки.

## ГЛАВА 5

### КОНСТРУИРОВАНИЕ РЭА ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ

#### § 5.1. Элементная база РЭА третьего поколения

Классификация и система обозначений интегральных микросхем. В настоящее время промышленность выпускает большое количество интегральных микросхем, которые делят в зависимости от технологического варианта изготовления ИМС на полупроводниковые, пленочные и гибридные; от частотного диапазона обрабатываемого сигнала — на низкочастотные (НЧ), высокочастотные

(ВЧ) и сверхвысокочастотные (СВЧ); от вида сигнала — на аналоговые и цифровые; от назначения и степени унификации — на универсальные и частного применения; от числа и плотности упаковки элементов, компонентов и кристаллов — на ИМС первой, второй и т. д. степеней интеграции; от наличия или отсутствия корпуса — на ИМС корпусные и бескорпусные.

Применение ИМС при конструировании РЭА уменьшает объем и потребляемую мощность РЭА, повышает надежность, создает условия для унификации технологического оборудования, способствует унификации и стандартизации схемных и конструктивных решений, обеспечивает высокое качество аппаратуры и эффективность ее производства.

ИМС широкого применения, как правило, выпускают сериями. Серию ИМС образует ряд отдельных функциональных микросхем, объединенных по виду технологии изготовления, напряжениям источников питания, входным и выходным сопротивлениям и уровням сигналов, конструктивному оформлению и способам крепления или монтажа. Обычно в серию ИМС входит такой набор функциональных микросхем, из которых можно построить законченное радиоэлектронное устройство. ИМС выпускают в корпусах и в бескорпусном исполнении.

*Корпусные* ИМС предназначены для монтажа на печатные платы в аппаратуре, не обеспечивающей защиты от воздействий окружающей среды, *бескорпусная* ИМС представляет собой, как правило, полупроводниковый кристалл, защищенный пленкой лака или тонким слоем герметизирующего компаунда. Бескорпусные ИМС предназначены для применения в ГИС, микросборках, блоках и аппаратуре, обеспечивающих защиту от внешних воздействий.

*Корпуса интегральных микросхем.* Корпуса микросхем выполняют целый ряд функций, для реализации которых конструкция корпуса должна удовлетворять следующим основным требованиям: защищать ИМС от воздействия окружающей среды и механических повреждений, а также обеспечить чистоту среды, окружающей элементы и компоненты ИМС; обеспечивать удобство и надежность монтажа кристаллов полупроводниковых ИМС и подложек ГИС в корпус, а также возможность монтажа компонентов при сборке ГИС; отводить тепло от микросхемы, размещенной внутри корпуса; обеспечивать надежное электрическое соединение элементов

схемы и электрическую изоляцию между токопроводящими элементами; обеспечивать надежное крепление корпуса; обладать коррозионной и радиационной стойкостью; быть простой и дешевой в изготовлении и обладать высокой надежностью.

Каждый вид корпуса характеризуется габаритными и присоединительными размерами, числом выводов и расположением их относительно плоскости основания корпуса. Выводы микросхем могут лежать в плоскости основания корпуса (планарные выводы) или быть перпендикулярными ему (штыревые выводы). Планарные выводы по сечению, как правило, прямоугольные, штыревые — круглые или прямоугольные. Габаритные и присоединительные размеры корпусов микросхем, число и шаг расположения выводов устанавливает ГОСТ 17467—79, который в зависимости от формы проекции тела корпуса на плоскость основания (печатную плату) и расположения выводов подразделяет корпуса на типы и подтипы, указанные в табл. 5.1. ГОСТ 17467—79 устанавливает типоразмеры корпусов каждого типа, а также систему обозначений корпусов по типоразмерам и количеству выводов. На рис. 5.1 приведена классификация корпусов ИМС, где показаны плоскость основания *ПО*; *УП* — установочная плоскость (плоскость, на которую устанавливается ИМС); *A* — расстояние от *УП* до верхней точки ИМС; *A<sub>1</sub>* — расстояние между *УП* и плоскостью основания ИМС; *A<sub>2</sub>* — расстояние от плоскости основания до верхней точки ИМС; *E* — ширина ИМС; *D* — длина ИМС; *H<sub>E</sub>* — общая ширина ИМС; *H<sub>D</sub>* — общая длина ИМС; *L, L<sub>D</sub>, L<sub>E</sub>* — длина выводов, пригодная для монтажа; *e* — шаг выводов (шаг позиций выводов); заштрихованные области, условно показанные со стороны основания, предназначены для размещения ключа ИМС, показывающего позицию первого вывода после установки ИМС на плате.

Каждому типу корпуса из пяти описанных в табл. 5.1 присущи свои преимущества и недостатки. Основным преимуществом корпусов 1, 2 и 3-го типов является более плотная компоновка и возможность использования методов групповой пайки (например, волна припоя) при установке микросхем в металлизированные отверстия печатной платы. Недостатки конструкции корпусов этих типов: сложность автоматизированной установки на печатные платы (ПП), так как необходимо обеспечить попадание в металлизированные отверстия всех выводов

Таблица 5.1

Тип	Подтип	Форма проекции корпуса на плоскость основания	Расположение проекции выводов (выводных площадок) на плоскость	Расположение выводных площадок относительно плоскости основания	Шаг позиций выводов и выходных площадок, мм
1	11	Прямоугольная	В пределах проекции тела корпуса	Перпендикулярное в один ряд	2,5
	12			Перпендикулярное в два ряда	
	13			Перпендикулярное в три и более ряда	
	14			Перпендикулярное по контуру прямоугольника	
2	21	Прямоугольная	За пределами проекции тела корпуса	Перпендикулярное в два ряда	2,5
	22			Перпендикулярное в четыре ряда в шахматном порядке	1,25 2,5
3	31 32	Круглая Овальная	В пределах проекции тела корпуса	Перпендикулярное по окружности	360°/n
4	41	Прямоугольная	За пределами проекции тела корпуса	Параллельное по двум противоположным сторонам	1,25 0,625
	42			Параллельное по четырем сторонам	1,25
5	51	Прямоугольная	В пределах проекции тела корпуса	Перпендикулярное для боковых выводных площадок; в плоскости основания для нижних выводных площадок	1,25

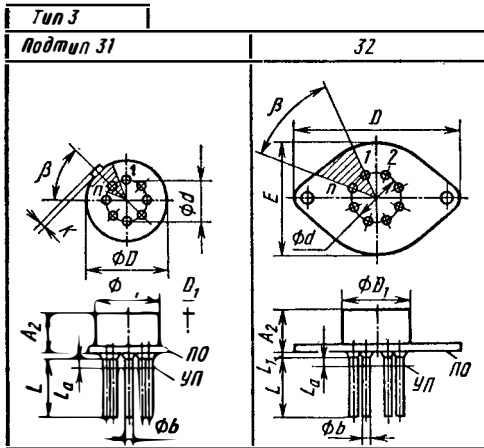
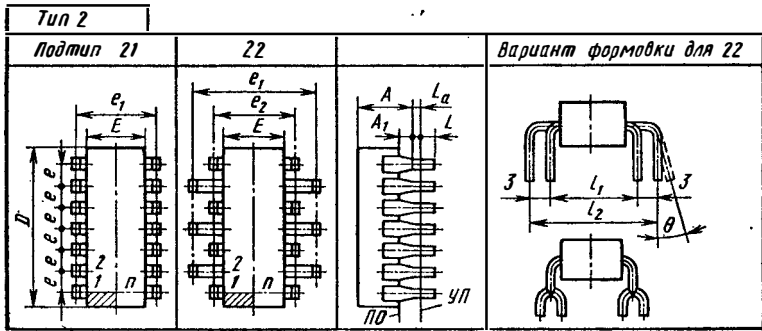
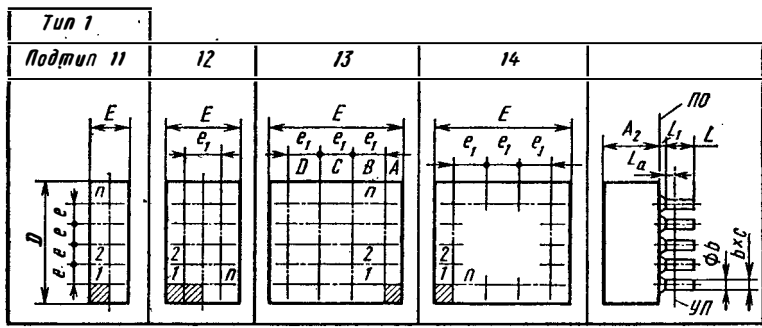


Рис. 5.1. Классификация корпусов ИМС

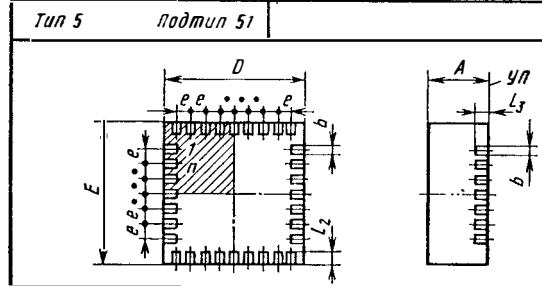
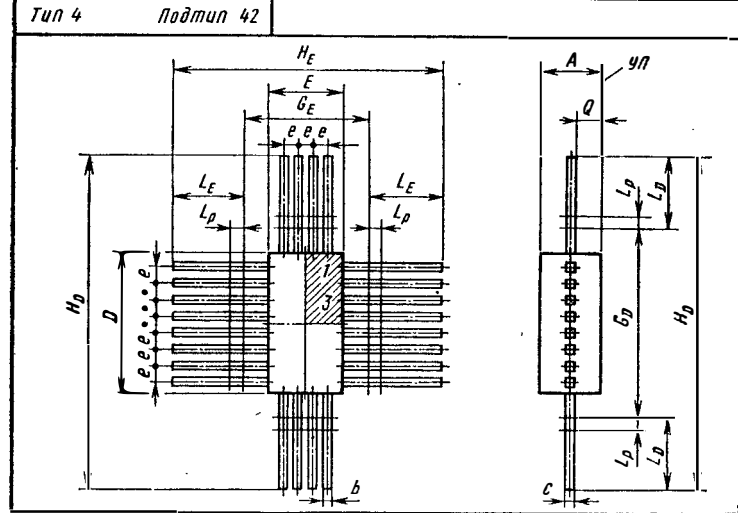
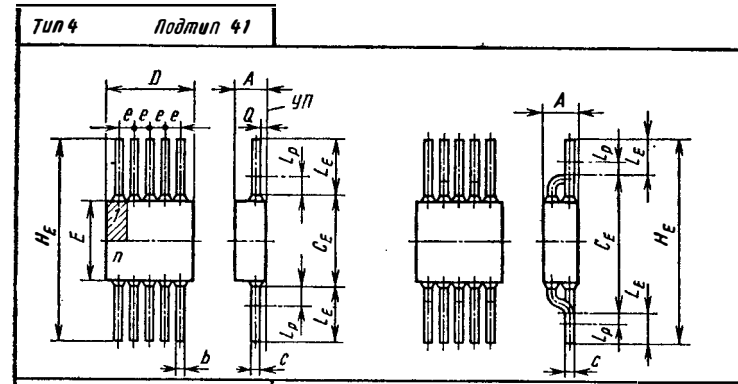


Рис. 5.1. Продолжение

ИМС одновременно; сложность визуального контроля качества пайки (особенно 1-й и 3-й типы), т. е. протекающие припой на другую сторону ПП под корпус ИМС; сложность замены ИМС, так как для съема необходим одновременный прогрев всех выводов корпуса ИМС; сложность применения групповых теплоотводов, так как монтажная плоскость занята выводами ИМС; большой шаг расположения выводов (2,5 мм), что при увеличении количества выводов ведет к резкому увеличению размеров и монтажной плоскости корпуса ИМС; невозможность использования в платах с объемным проводным монтажом и комбинированных платах; для 3-го типа дополнительно — необходимость сложной формовки и ограниченное количество выводов (не более 12).

Все эти недостатки отсутствуют в корпусах 4-го типа, которые имеют преимущества: шаг расположения выводов вдвое меньше (1,25 мм и 0,625 мм), так как для выводов не нужно иметь металлизированных монтажных отверстий, и поэтому этот тип корпуса может иметь большое количество выводов без заметного увеличения размеров корпуса; возможность полноценного использования обратной стороны в ДПП и особенно двустороннего расположения ИМС в МПП.

К недостаткам корпусов 4-го типа нужно отнести меньшую плотность компоновки, потому что посадочное место ИМС более чем вдвое больше площади корпуса.

Появление корпусов 5-го типа является компромиссом между корпусами 1-го и 4-го типов, так как резко уменьшена площадь корпуса с выводными площадками и сохранены преимущества планарных корпусов. Применение корпусов 5-го типа, названных кристаллодержателями, дает возможность не только увеличить плотность компоновки ИМС, но и улучшить их электрические параметры, так как более короткие выводы корпусов-кристаллодержателей позволяют повысить частотный предел типовой микросхемы примерно в три раза по сравнению с величиной, обеспечиваемой при упаковке этой микросхемы в другой корпус. Кроме того, при одинаковом общем числе выводов контактное сопротивление кристаллодержателей намного меньше, чем у корпусов других типов. Но наиболее очевидным преимуществом корпусов-кристаллодержателей по сравнению с традиционными корпусами является значительное уменьшение геометрических параметров по отношению к одному и тому же кристаллу с одинаковым количеством выводов.

Однако у корпусов 5-го типа имеются проблемы, затрудняющие их широкое применение: необходимы материалы соединений, выдерживающие косвенный нагрев (например, керамические платы с нанесением соединительным методом толстопленочной технологии); нужны методы неразрушающего контроля; подложка должна быть жесткой, так как необходима высокая плоскостность, а значит, коробление недопустимо.

В соответствии с ГОСТ 17467—79 условное обозначение корпуса должно состоять из слова корпус, типоразмера микросхемы, включающего подтип корпуса и двухзначное число, обозначающее порядковый номер типоразмера, цифрового индекса, определяющего действительное количество выводов, порядкового регистрационного номера и обозначение настоящего стандарта. Пример условного обозначения: корпус 2101 14—5 ГОСТ 17467—79.

**Материалы корпусов ИМС.** По конструктивно-технологическому признаку различают корпуса: а) металло-стеклянные (стеклянное или металлическое основание, соединенное с металлической крышкой с помощью сварки; выводы изолированы стеклом); б) металлополимерные (подложка с элементами и выводами помещается в металлическую крышку, после чего осуществляется герметизация путем заливки компаундом); в) металлокерамические (керамическое основание, соединенное с металлической крышкой с помощью сварки или пайки); г) керамические и керамикостеклянные (керамическое основание и крышка, соединенные между собой пайкой); д) пластмассовые (пластмассовое основание, соединенное с пластмассовой крышкой опрессовкой).

Плоские прямоугольные металлокерамические и металlostеклянные корпуса обеспечивают надежную герметизацию, высокую механическую прочность, имеют низкое термическое сопротивление, т. е. хорошо рассеивают теплоту, но они дороги, потому что содержат драгоценные металлы, и громоздки, а поэтому малоперспективны. Наиболее дешевы монолитные пластмассовые корпуса, они обеспечивают наилучшую защиту ИМС от механических воздействий, но гораздо хуже металlostеклянных корпусов в отношении защиты ИМС от климатических воздействий и обеспечения оптимальных тепловых режимов работы ИМС, а потому они используются только в аппаратуре с пониженными требованиями. Наиболее перспективны керамические корпуса, так как они

достаточно дешевы и в меру прочны, почти так же герметичны, как и металлостеклянные корпуса, обладают высокой теплопроводностью и имеют хорошую адгезию с металлическими пленками, наносимыми на керамику.

Для характеристики материала и типа корпуса в соответствии с ОСТ 11 073.915—80 в условное обозначение ИМС перед цифровым обозначением серии добавляется соответствующая буква.

## § 5.2. Печатные платы, гибкие шлейфы и кабели

**Классификация и особенности печатных плат.** Печатные платы в настоящее время получили самое широкое распространение. Их применение обеспечивает идентичность электрических параметров — от образца к образцу, замену значительной части ручных монтажных операций машинными, допускающими использование полуавтоматических и автоматических установок, поточных линий и автоматизированных средств контроля, что делает их экономически и технически целесообразными. С точки зрения конструктивных преимуществ применение печатных плат позволяет улучшить такие параметры, как плотность монтажа и масса.

В настоящее время выпускается несколько типов печатных плат, имеющих различные конструктивные особенности: односторонние (ОПП), двусторонние (ДПП) и многослойные печатные платы (МПП), гибкие печатные платы (ГПП), гибко-жесткие печатные платы (ГЖПП), гибкие печатные кабели (ГПК) и шлейфы (ГПШ). Они имеют достаточно сходные прогрессивные технологические процессы изготовления, за исключением печатных плат для узлов СВЧ.

Технологические методы изготовления печатных плат, а их разработано более 20, базируются на двух направлениях получения проводящего материала платы: субтрактивный, вычитание или избирательное удаление проводящего материала на фольгированном диэлектрике; аддитивный, прибавление или избирательное нанесение проводящего материала на чистый диэлектрик.

В соответствии с этим для изготовления ОПП и ДПП наиболее широкое распространение получили три метода изготовления печатных плат: химический, электрохимический, или полуаддитивный, комбинированный позитивный.

**Химический негативный метод** широко применяется не только в производстве ОПП, но и для изготовления внутренних слоев МПП, а также ГПК, ГПШ и т. д. Основным преимуществом химического метода является простота и малая длительность технологического цикла, что облегчает автоматизацию, а недостатком — отсутствие металлизированных соединений между сторонами платы (рис. 5.2).

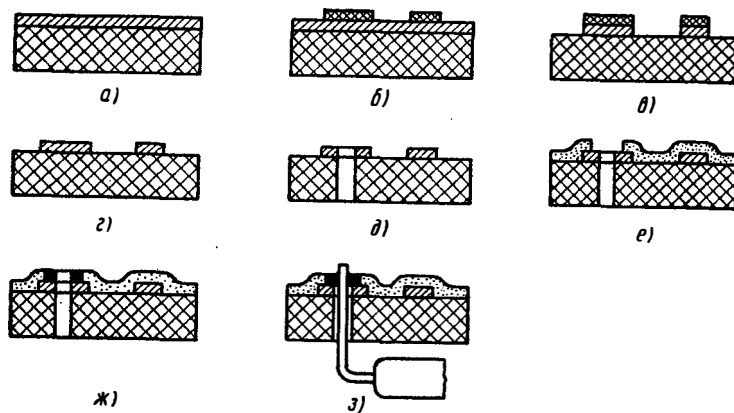


Рис. 5.2. Последовательность основных операций изготовления печатных плат химическим негативным методом:

а — заготовка платы из фольгированного диэлектрика; б — нанесение резистивного печатного рисунка; в — травление печатного рисунка; г — удаление лаковой (эпоксидной) маски; д — механическая обработка монтажных отверстий; е — нанесение лаковой (эпоксидной) маски; ж — облуживание контактных площадок; з — пайка выводов радиоэлементов

**Электрохимический, или полуаддитивный, метод** дороже, требует большего количества специализированного технического оборудования, менее надежен, но необходим для ДПП с повышенной плотностью монтажа.

**Комбинированный позитивный метод** основан на химическом и электрохимическом методах и является основным при изготовлении двусторонних печатных плат (рис. 5.3).

При разработке приборов широко используются МПП (позволяющие решать задачу соединения многовыводных компонентов схемы), которые, имея ряд особенностей, сохраняют все основные свойства обычных печатных плат, причем химический и комбинированный позитивный методы являются основными для получения МПП различных конструкций. В технологии изготовле-



ния МПП существуют два направления изготовления плат: а) с применением гальванических процессов для получения межслойных соединений (методы металлизации сквозных отверстий, попарного прессования, послойного наращивания) (рис. 5.4, 5.5, 5.6); б) без межслойных соединений и получение их при необходимости последующей сваркой или пайкой (метод открытых кон-

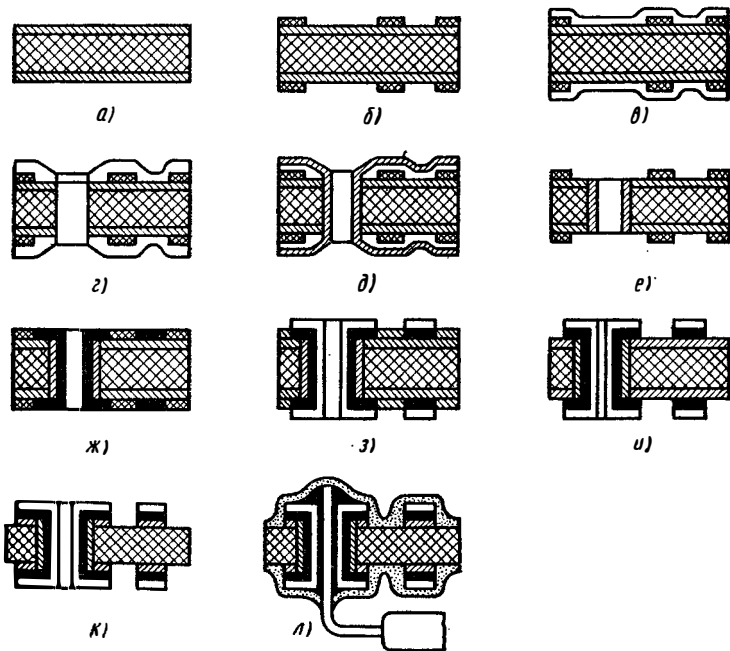


Рис. 5.3. Последовательность основных операций изготовления печатных плат комбинированным позитивным методом:

а — заготовка печатной платы из фольгированного диэлектрика; б — нанесение резистивного печатного рисунка; в — нанесение лаковой рубашки; г — сверление монтажных и переходных отверстий; д — химическое меднение; е — удаление лаковой рубашки; ж — гальваническое меднение; з — нанесение защитного покрытия; и — удаление резиста; к — травление печатного рисунка; л — пайка выводов радиоэлементов и лакировка платы

тактных площадок, метод выступающих выводов) (рис. 5.7, 5.8). Основные качественные характеристики рассмотренных конструкторско-технологических методов печатного монтажа приведены в табл. 5.2.

**Гибкие печатные кабели и шлейфы.** Печатные платы ячеек соединяются между собой жгутами гибких проводов, гибкими шлейфами или кабелями. Тканые или оп-

рессованные кабели изготавливаются из тех же проводов, что и жгуты. Плоская форма этих изделий позволяет более рационально использовать внутренний объем корпуса блока. Гибкие печатные шлейфы изготавливаются по той же технологии, что и печатные платы, однако более пластичная основа позволяет изгибать их под очень острым углом для осуществления соединения двух параллельно расположенных плат.

По конструктивному оформлению и способам присоединения к печатным платам ГПП могут быть выполне-

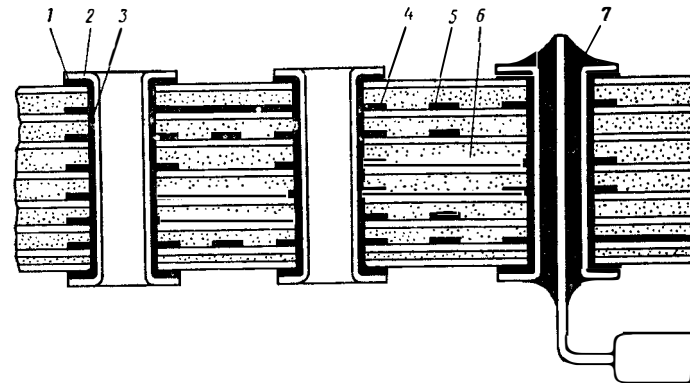


Рис. 5.4. Структура МПП, изготовленной методом металлизации сквозных отверстий:

1 — контактная площадка наружного слоя; 2 — защитное покрытие; 3 — металлизация сквозного отверстия; 4 — контактная площадка внутреннего слоя; 5 — печатный проводник сигнального слоя X; 6 — печатный проводник сигнального слоя Y; 7 — пайка выводов радиоэлемента

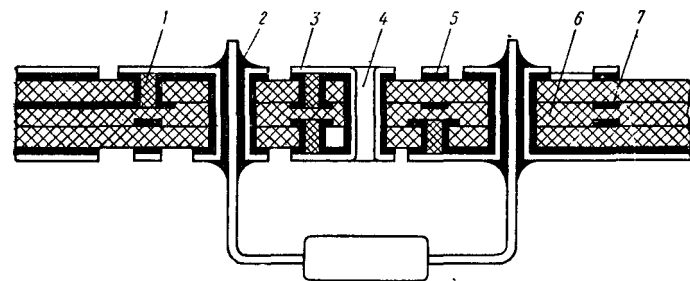


Рис. 5.5. Структура МПП попарного прессования:

1 — переходное отверстие между внутренними и наружными слоями, заполненное связующим межслойной изоляцией; 2 — монтажное отверстие; 3 — защитное покрытие; 4 — переходное отверстие между наружными слоями; 5 — печатный проводник наружного слоя; 6 — межслойная изоляция; 7 — печатный проводник внутреннего слоя

ны в трех вариантах. К *первому* относятся ГПШ, оканчивающиеся металлизированными конкретными площадками с отверстиями. Шлейфы устанавливаются и запаиваются на штыри, расположенные на печатной плате или колодке; ко *второму* — ГПШ, оканчивающиеся металлизированными контактными площадками, которые после совмещения припаиваются к контактному площадкам печатной платы; к *третьему* — ГПШ, оканчивающиеся контактными лепестками, которые припаиваются к контактному площадкам печатной платы. Эти шлейфы могут иметь однорядные или двухрядные контактные лепестки

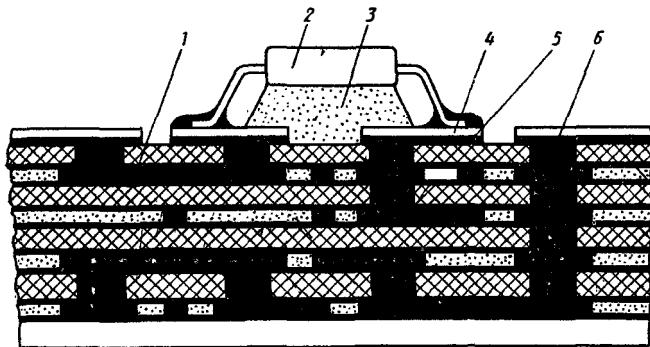


Рис. 5.6. Структура МПП послойного наращивания:

1 — печатный проводник внутреннего слоя; 2 — радиэлемент с планарными выводами; 3 — клеящая мастика; 4 — защитное покрытие наружного слоя; 5 — монтажная контактная площадка; 6 — межслойный переход («столбик» меди)

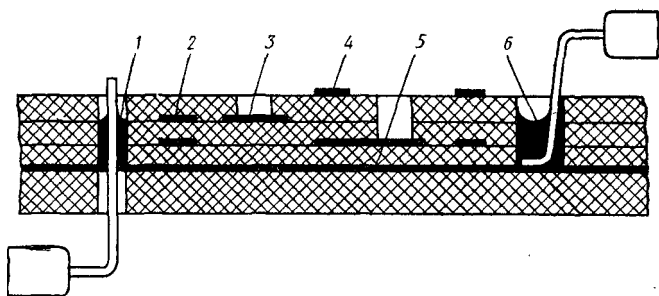


Рис. 5.7. Структура МПП, изготовленной методом открытых контактных площадок:

1 — пайка в «колодец» штыревого вывода; 2 — печатный проводник внутреннего слоя; 3 — монтажная площадка; 4 — печатный проводник внешнего слоя; 5 — соединение монтажных площадок в одном слое; 6 — пайка в «колодец» планарного вывода

Таблица 5.2

№ п/п	Конструкторско-технологические методы	Характеристики							
		Плотность монтажа	Число слоев	Стоимость	Надежность соединений	Длительность цикла изготовления	Стойкость к внешним воздействиям	Тип выводов элементов	Возможность механизированного монтажа
1	Химический негативный (односторонние печатные платы)	Наиболее низкая	1	Низкая	Низкая	Короткая	Удовлетворительная	Штыревые, планарные	Имеется
2	Комбинированный позитивный (двусторонние печатные платы)	Выше 1	2	»	Средняя	»	»	То же	»
3	Попарного прессования	» 2	До 4	»	Низкая	Средняя	»	»	»
4	Открытых контактных площадок	» 3	» 12	»	Высокая	Короткая	»	»	»
5	Выступающих выводов	» 4	» 20	Высокая	»	Средняя	Хорошая	Планарные	Не имеется
6	Металлизации сквозных отверстий	» 5	» 20	Низкая	Средняя	»	Без покрытия, средняя	Штыревые, планарные	Имеется
7	Послойного наращивания	Наиболее высокая	» 5	Высокая	Высокая	Длинная	Хорошая	Планарные	»

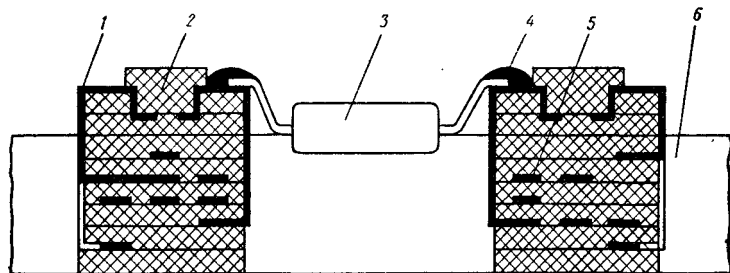


Рис. 5.8. Структура МПП, изготовленной методом выступающих выводов:

1 — переход печатного проводника в монтажную площадку; 2 — крепящая колодка; 3 — радиоэлемент с планарными выводами; 4 — пайка выводов радиоэлемента; 5 — печатный проводник внутреннего слоя; 6 — окно платы

(рис. 5.9) и обязательно крепятся в зоне электрического присоединения к печатным платам с помощью прижимной планки или скобы.

**Электрические параметры печатных плат.** Большая поверхность и хороший тепловой контакт с изоляционным основанием обеспечивают интенсивную отдачу теплоты от проводника изоляционной плате и в окружающее пространство, что позволяет пропускать через печатные проводники значительно большие токи, чем через объемные того же сечения. Для печатных проводников, расположенных на наружных слоях, допускается плотность тока до  $20 \text{ А/мм}^2$ , а для расположенных на внутренних слоях МПП — до  $15 \text{ А/мм}^2$ . Для печатных плат, используемых в бытовой аппаратуре, допускается плотность тока до  $30 \text{ А/мм}^2$ . При этом заметного нагрева проводников не наблюдается.

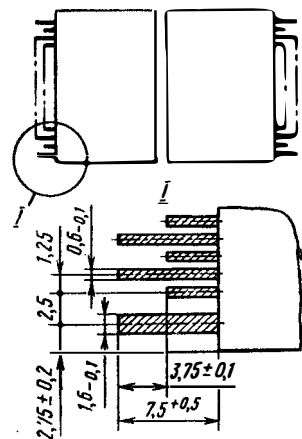


Рис. 5.9. Гибкий печатный шлейф с двухрядным расположением контактных лепестков

Допустимое рабочее напряжение между двумя расположенными рядом печатными проводниками зависит от величины минимального зазора между ними. Для плат, покрытых

после изготовления влагозащитным лаком, значение рабочего напряжения можно выбрать из табл. 5.3.

Таблица 5.3

Зазор между проводниками $l$ , мм	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	2,5
Допустимое рабочее напряжение $U$ , В	50	75	100	125	150	175	250	500

Для МПП значение напряжения  $U$  не должно превышать  $250 \text{ В}$ . Значение сопротивления печатных проводников можно рассчитать по формуле

$$R = \rho l / S, \quad (5.1)$$

где  $l$  — длина проводника, мм;  $S = b \times h$  — сечение проводника,  $\text{мм}^2$ ;  $\rho$  — удельное объемное электрическое сопротивление проводника,  $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ;  $R$  — сопротивление проводника,  $\text{Ом}$ .

При этом следует учитывать, что слой меди, полученный электролитическим осаждением, имеет менее плотную структуру, чем проводник, полученный травлением фольги. Поэтому для проводников, изготовленных химическим методом, нужно в формулу подставлять  $\rho = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ . Для проводников, полученных электрохимическим методом, следует принимать  $\rho = 0,0235 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ . При комбинированном методе удельное сопротивление проводника определяется как участками из фольги, так и участками, полученными электрохимическим методом, и  $\rho = 0,02 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ .

Между двумя параллельно расположенными проводниками могут появиться гальванические связи за счет утечек по изоляции, а также емкостные. Значение емкости между печатными проводниками можно вычислить по формуле (5.2):

$$C = K \epsilon, \quad (5.2)$$

где  $C$  — емкость,  $\text{пФ}$ ;  $K$  — коэффициент, величина которого зависит от ширины проводников и их взаимного расположения,  $\text{пФ/см}$ ; значения  $K$  для встречающихся в практике случаев приведены на рис. 5.10;  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей пространство между проводниками;  $l$  — длина взаимного перекрытия проводников, см.

При расположении проводников, которому соответствуют характеристики 1 и 2 (рис. 5.10), линии электрического поля проходят частично через воздух, а частично через изоляционную плату. Поэтому в (5.2) следует подставлять среднеарифметическое значение относительной диэлектрической проницаемости воздуха и изоляционной платы, которое можно определить по формуле

$$\varepsilon \approx (1 + \varepsilon_D)/2, \quad (5.3)$$

где  $\varepsilon_D$  — относительная диэлектрическая проницаемость изоляционной платы, на которой расположены печатные проводники. Для взаимного расположения проводников, соответствующего графикам 3 и 4 (рис. 5.10), в (5.2) следует подставлять  $\varepsilon_D$ .

Емкость, а также гальванические связи между двумя параллельными проводниками, расположенными на одной стороне платы, можно уменьшить, если разместить между ними заземленный экран в виде такого же проводника.

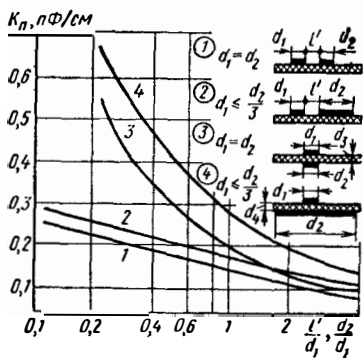


Рис. 5.10. Зависимость коэффициента пропорциональности  $K_n$  от параметров печатной платы:

$l'$  — расстояние между печатными проводниками;  $d_1$ ,  $d_2$  — ширина печатных проводников

Значение индуктивности прямого печатного проводника зависит от его длины, ширины и толщины. Для проводников толщиной 50 мкм величину погонной индуктивности  $L_{\text{пог}}$  можно определить по графику рис. 5.11.

Между двумя параллельно расположенными проводниками кроме емкостной существует индуктивная взаимосвязь. Для расположения проводников, показанных на рис. 5.12, а, значение взаимной индукции можно определить по формуле

$$M = 2l \left( \ln \frac{2l}{l'} - 1 \right), \quad (5.4)$$

где  $M$  — значение взаимной индукции, Гн;  $l$  — длина проводника, см;  $l'$  — расстояние между проводниками, см.

Для взаимного расположения, показанного на рис. 5.12, б,

$$M = 2l \left( \ln \frac{2d}{l'} + \frac{l'}{l} \right), \quad (5.5)$$

где  $d$  — толщина диэлектрика печатной платы, см.

Основные правила конструирования печатных плат. По плотности проводящего рисунка и точности изготовления печатные платы и ГПК делятся на три класса. Первый характеризуется наименьшей плотностью про-

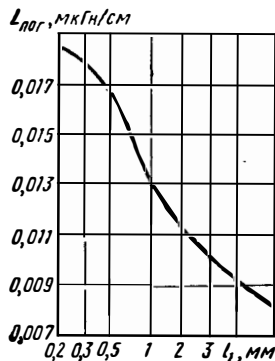


Рис. 5.11. Зависимость погонной индуктивности печатного проводника от его ширины (толщина проводника 0,05 мм)

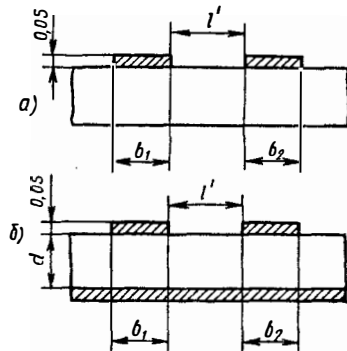


Рис. 5.12. Расположение проводников на коммутационной плате:

а — без экранирующей плоскости; б — с экранирующей плоскостью

дущего рисунка и наименьшей точностью изготовления; второй и третий — повышенной и высокой плотностью проводящего рисунка соответственно, а также высокой точностью изготовления.

Минимально допустимые значения основных параметров, определяющих принадлежность печатной платы или ГПК к тому или иному классу, приведены в табл. 5.4.

Рекомендуется выполнять платы всех размеров с плотностью проводящего рисунка, соответствующей 1-му классу. На платах с размерами не более  $240 \times 400$  мм можно создать плотность проводящего рисунка, соответствующую 2-му классу, и только на печатных платах с размерами не более  $170 \times 170$  мм можно создать плотность проводящего рисунка, соответствующую 3-му классу. На одной плате могут располагаться элементы про-

Таблица 5.4

Наименование параметров	Условное обозначение параметров	Размеры элементов проводящего рисунка для классов, мм		
		1-го	2-го	3-го
Ширина проводника	$b$	0,500	0,250	0,150
Расстояние между проводниками, контактными площадками, проводниками и контактной площадкой или проводником и металлизированным отверстием	$l'$	0,500	0,250	0,150
Расстояние от края просверленного отверстия (зенковки) до края контактной площадки данного отверстия (зенковки)	$b_m$	0,500	0,250	0,150
Отношение минимального диаметра металлизированного отверстия к толщине платы	$j$	0,400	0,330	0,330

дыщего рисунка разных классов. В этом случае печатная плата относится к более высокому классу.

Плотность проводящего рисунка ГПК или ГПШ определяется шагом расположения печатных проводников, который может быть выбран из ряда: 0,625; 1,25; 2,50 мм, причем при конструировании ГПК и ГПШ применяют проводящий рисунок 3-го и 2-го классов плотности. Максимальные размеры ГПК и ГПШ определяются конструкцией изделия и технологическими возможностями их производства, но чаще всего не превышают размеров 150×400 мм с допустимым радиусом изгиба не менее 1,0—3,0 мм.

Толщину ГПК и ГПШ выбирают в пределах 0,06—0,30 мм, толщину ОПП и ДПП определяют толщиной выбранного материала, но в основном она лежит в пределах от 1,0 до 1,5 мм, а толщину МПП определяют числом слоев, прокладок из стандартных материалов и технологией их склеивания. Суммарную толщину склеивающих прокладок между смежными слоями обычно выбирают не тоньше двух толщин проводников, расположенных на внутренних слоях.

Чертежи печатных плат выполняют на бумаге, имеющей координатную сетку, нанесенную с определенным шагом (рис. 5.13). Наличие сетки позволяет не ставить на чертеже размеры на все элементы печатного проводника. По сетке можно воспроизвести рисунок печатной платы при изготовлении фотооригиналов, с которых изготавливаются шаблоны (например, фотонегативы) для нанесения рисунка платы на заготовку. Координатную сетку наносят на чертеж с шагом 2,5; 1,25; 0,625 мм.

Центры монтажных, переходных и крепежных отверстий должны располагаться в узлах координатной сетки, причем центры отверстий под неформуемые выводы многовыводных навесных элементов, расстояния между которыми не кратны шагу координатной сетки, располагают таким образом, чтобы в узле сетки находился центр одного из отверстий, а центры отверстий под остальные выводы располагались согласно конструкции элемента. Максимальные отклонения расстояний между центрами отверстий не должны быть более  $\pm 0,2$  мм для плат 1-го класса,  $\pm 0,1$  мм для плат 2-го и 3-го классов.

Диаметр металлизированных и неметаллизированных отверстий в печатной плате должен быть больше диаметра вставляемого в него вывода, что обеспечивает возможность свободной установки электрорадиоэлемента и протекание припоя на всю глубину металлизированного отверстия. Диаметры монтажных и переходных металлизированных и неметаллизированных отверстий выбирают в соответствии с табл. 5.5.

Монтажные отверстия для плоских выводов следует выбирать, как и для круглых, образуемых диаметром окружности, описанной вокруг сечения вывода. Монтажные и переходные металлизированные отверстия следует

Таблица 5.5

Номинальный диаметр		Максимальный диаметр вывода навесного элемента
монтажного неметаллизированного отверстия	монтажного и переходного металлизированного отверстия с учетом металлизации	
0,5	0,4	—
0,7	0,6	До 0,4
0,9	0,8	Св. 0,4 до 0,6 включ.
1,1	1,0	» 0,6 » 0,8 »
1,6	1,5	» 0,8 » 1,3 »
2,1	2,0	» 1,3 » 1,7 »

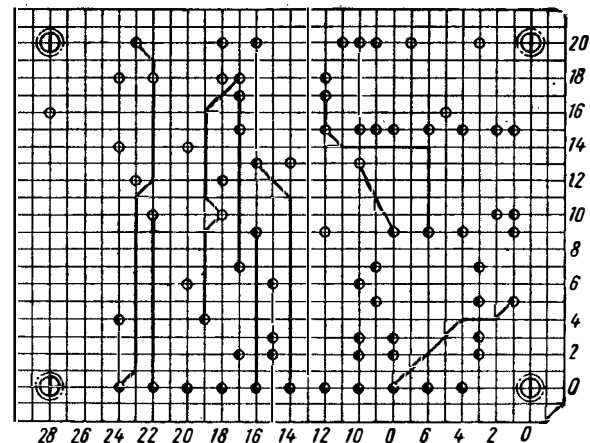
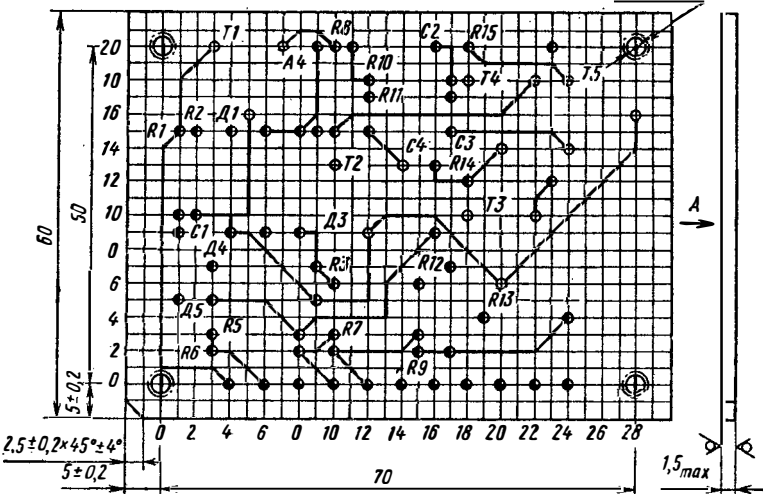


Рис. 5.13. Продолжение

Условное обозначение отверстий	Диаметр отверстий, мм	Диаметр контактной площадки, мм	Наличие металлизации в отверстиях	Число отверстий
○	0,8 <sup>+0,1</sup>	1,45-0,1	есть	14
●	1,3 <sup>+0,12</sup>	2,0-0,1	есть	48
⊙	1,8 <sup>+0,12</sup>	2,5-0,1	есть	11
⊖	3,0A5	—	нет	4

Параметры элементов печатной платы, кроме мест, оговоренных особо	Размеры, мм, не менее	
	Ø свободных мест	Ø узких мест
Ширина проводников	0,5	0,25
Расстояние между двумя проводниками, контактными площадками, проводником и контактной площадкой	0,5	0,25

Рис. 5.13. Чертеж печатной платы

выполнять без зенковки, но для того чтобы обеспечить надежное соединение металлизированного отверстия с печатным проводником, вокруг отверстия на наружных слоях ДПП и МПП со стороны фольги делают контактные площадки. На внутренних слоях МПП контактные площадки должны быть у отверстий на тех слоях, по которым к ним подходят проводники, однако для повышения надежности следует предусматривать контактные площадки на внутренних слоях МПП и у металлизированных отверстий, электрически не связанных с этими слоями.

Контактные площадки выполняют прямоугольной, круглой или близкой к ним формы, а контактную площадку, обозначающую расположение первого вывода многовыводного навесного элемента, выполняют по форме, отличной от остальных контактных площадок, если отсутствует маркировка этого вывода. При конструировании ОПП и ДПП, изготавливаемых химическим методом, возможно уменьшение контактной площадки с одной или с двух сторон, причем на печатных платах 1-го класса плотности площадь оставшейся части контактной площадки без площади отверстия должна составлять не менее 2,5 мм<sup>2</sup>, на платах 2-го класса — не менее 1,6 мм<sup>2</sup>, а на платах 3-го класса — не менее 1,2 мм<sup>2</sup>. Номинальный диаметр контактной площадки металлизированного отверстия для внутренних слоев МПП можно определить по формуле

$$D_{\min} = d_{\text{м отв}} + 2b_{\text{м}} + 1,5h_{\text{ф}} + 2\delta_{\text{л}} + C, \quad (5.6)$$

где  $d_{\text{м отв}}$  — диаметр металлизированного отверстия, мм (из табл. 5.5);  $b_{\text{м}}$  — расстояние от края просверленного отверстия до края контактной площадки этого отверстия, мм (из табл. 5.4);  $h_{\text{ф}}$  — толщина фольги, мм;  $C$  — суммарный коэффициент технологических погрешностей, назначаемый в зависимости от метода изготовления печатной платы и применяемого технологического оборудования. Числовое значение коэффициента  $C$  для 1-го

класса плотности составляет 0,65 мм, для 2-го и 3-го — 0,30 мм;  $\delta_l = \delta_m L / 100$  — изменение длины печатной платы в результате нестабильности линейных размеров, мм ( $L$  — максимальный размер стороны печатной платы, мм;  $\delta_m$  — погрешность положения контактной площадки на слое из-за нестабильности линейных размеров, которая определяется по техническим условиям на материал). При расчете диаметра контактных площадок для ДПП и наружных слоев МПП в (5.6) опускают слагаемое  $2\delta_l$ .

Печатные проводники рекомендуется выполнять прямоугольной конфигурации, располагая их параллельно линиям координатной сетки. Печатные проводники выполняют одинаковой ширины на всем их протяжении, но для прохождения узкого места при ручном проектировании следует сужать проводник до минимально допустимых значений его ширины на возможно меньшей длине. Элементы проводящего рисунка следует располагать от края печатной платы, паза, выреза, неметаллизированного отверстия на расстоянии, равном номинальной толщине печатной платы с учетом допуска на линейный размер платы, а для плат толщиной менее 1 мм и для ГПК — на расстоянии не менее 1 мм.

Возможность прокладки в узком месте между двумя металлизированными отверстиями требуемого количества проводников следует проверять по формуле

$$l_{\min} = \frac{D_{1\max} + D_{2\max}}{2} + 2\delta_{ш} + (b_{\max} + \delta_{ш})n + l'_{(n+1)}, \quad (5.7)$$

где  $l_{\min}$  — минимальное расстояние для прокладки  $n$ -го количества проводников между двумя контактными площадками металлизированных отверстий, мм;  $D_{1\max}$ ,  $D_{2\max}$  — максимальные диаметры контактных площадок, мм [по формуле (5.6) с соответствующим коэффициентом  $C$ ];  $\delta_{ш}$  — погрешность расположения элементов проводящего рисунка относительно координатной сетки на фотошаблоне. Числовое значение  $\delta_{ш}$  для 1-го класса плотности составляет 0,06 мм, для 2-го — 0,05 мм, а для 3-го — 0,03 мм;  $b_{\max}$  — максимальная ширина проводника, мм (из табл. 5.4);  $l'$  — расстояние между проводниками и металлизированным отверстием, мм (из табл. 5.4).

Если существует возможность, то необходимо использовать проводники максимальной ширины. При этом проводники шириной более 3 мм разрабатываются по правилам выполнения экранов. Как правило, они выполняются с вырезами, площадь которых может достигать половины общей площади слоя. Эти вырезы могут иметь прямоугольную форму, форму овала, круга или сетки. Для внутренних экранов предпочтительной является форма сетки. Если в зону экрана попадает отверстие, электрически с ним не связанное, то вокруг него выполняется кольцевой или прямоугольный вырез шири-

ной не менее 0,5 мм. Отверстия, электрически связанные с экраном и попавшие в окна экранной сетки, соединяются с ним печатными проводниками.

Проводники, ширина которых менее 2 мм, на чертежах обычно изображаются сплошной линией, толщина которой равна двум толщинам контурных линий, как показано на рис. 5.13. Проводники, экраны и другие элементы, ширина которых более 2 мм, штрихуются под углом 45°. Если же чертежи выполняются для размножения фотокопированием или электрографическим копированием, то изображения широких печатных проводников и других элементов проводящего рисунка полностью зачерняются.

### § 5.3. Компоновка РЭА третьего поколения

**Общие требования к конструированию сборочных единиц первого уровня.** Как уже отмечалось, вся РЭА подразделяется на ряд конструктивных уровней, причем каждый из них характеризуется специфическими методами проектирования и изготовления. Наиболее трудоемкой в процессе проектирования и изготовления РЭА является функциональная ячейка. В процессе проектирования ФЯ необходимо решить следующие задачи: выбрать вариант конструкции ячейки; осуществить рациональную компоновку конструктивно-технологических зон на печатных платах ячеек; выбрать типоразмеры печатных плат; определить тип электрического соединителя; выбрать элементы крепления, контроля и фиксации; метод изготовления печатных плат и т. д. Решение поставленных задач влияет на технологию изготовления аппаратуры и на условия ее эксплуатации.

По конструктивному назначению ФЯ предназначены для установки в блоки, поэтому выбор варианта конструктивного исполнения ячейки характеризуется вариантом конструкции блока. Как уже отмечалось, существуют три основных варианта конструкции блоков: разъемная, книжная и веерная. Наиболее широкое применение при проектировании РЭА третьего поколения нашла разъемная конструкция блоков и наименьшее из-за низкой технологичности — веерная. Книжная применяется в основном для аппаратуры, типовой элемент замены которой не ниже уровня блока, что обусловливается большим временем, необходимым для замены ячейки, так как внутриблочная электрическая коммутация выполняется с помощью паяного, трудно демонтируемого соединения.

Конструктивно ячейки подразделяются по различиям в несущих конструкциях, которые заключаются в наличии или отсутствии рамок, предназначенных для улуч-

шения эксплуатационных параметров, а в некоторых случаях для исключения деформации печатных плат ячеек, возникающей в процессе изготовления и эксплуатации под действием внешней среды, неравномерности нагревания печатных проводников при прохождении через них электрического тока. Поэтому выбор варианта исполнения ячейки (рамочный или безрамочный) осуществляют на первом этапе проектирования, исходя из требований к механическим воздействиям, а также с учетом линейных размеров печатных плат.

**Выбор типоразмеров печатных плат.** Выбор необходимого типоразмера печатных плат ячеек должен определяться, с одной стороны, видом аппаратуры и вариантом конструкции ячейки с учетом конструкции блока и обеспечения условий эксплуатации, а с другой — при модульном построении аппаратуры и при условии, что модулем является функционально и конструктивно законченная ячейка широкого применения, необходима достаточно жесткая унификация типоразмеров печатных плат, охватывающая все виды аппаратуры.

Наиболее широко применяются два направления унифицированных типоразмеров ПП, в которых один размер (высота  $H$ ) является постоянным, а другой (длина  $L$ ) — переменным. В первом направлении унифицированных типоразмеров исходной привязкой для постоянного размера ПП является высота стандартного блока, которая составляет  $H=194$  мм, и поэтому высота ПП выбрана равной 170 мм. Переменные размеры для длины  $L$  в первом направлении выбираются из следующего ряда: 75, 110, 150, 200, 280 мм. Во втором направлении унифицированных типоразмеров исходной привязкой для постоянного размера ПП является унифицированная ширина бортового прибора, которая составляет  $B=170$  мм, а поэтому высота ПП выбрана равной 160 мм. Переменные размеры для длины  $L$  выбирают из ряда: 90, 125, 140, 220, 280 мм.

**Основные правила установки корпусированных ИМС, МСБ и ЭРЭ на печатные платы.** Под компоновкой ЭРЭ, микросхем и МСБ следует понимать их взаимную ориентацию в рабочей зоне печатной платы ячейки. Микросхемы и МСБ, как правило, располагаются на плате линейно-многорядным способом, что позволяет применять механизированные и автоматизированные методы сборки ячеек, а также осуществлять линейный теплосток с помощью шин под микросхемами.

Компоновка ЭРЭ, микросхем и МСБ может осуществляться как с одной стороны печатной платы, так и с двух. При этом метод установки ЭРЭ, микросхем и МСБ на печатную плату должен обеспечивать надежное механическое крепление и электрическое соединение выводов с контактными площадками ПП и возможность обеспечения демонтажа ЭРЭ, микросхемы и МСБ в процессе изготовления и настройки ячейки.

В зависимости от конструктивного исполнения корпуса ЭРЭ, микросхемы или МСБ они могут устанавливаться на ПП ячейки с формовкой или без формовки выводов. Формовка производится для увеличения расстояния между выводами, фиксации расстояния от корпуса до печатной платы, совмещения выводов с узлами координатной сетки ПП и обеспечения плотного прилегания плоского вывода к контактными площадкам при его электрическом присоединении.

В соответствии с нормативными документами существует восемь вариантов установки различных элементов на печатные платы, из которых пять с соответствующими подвариантами приходится на установку дискретных ЭРЭ (например, установка резистора в металлизированные отверстия, внахлестку на контактные площадки, вертикально и т. д., рис. 5.14), а три соответствуют установке микросхем и МСБ (рис. 5.15). Соединения вывода элемента с контактами печатной платы необходимо осуществлять: в отверстия металлизированные и неметаллизированные — при одностороннем расположении на печатной плате резисторов, конденсаторов, дросселей, полупроводниковых приборов, матриц, блоков и реле; в отверстия металлизированные — при одностороннем расположении на печатной плате микросхем и МСБ в корпусах 1, 2 и 3-го типов, внахлестку — при одностороннем и двустороннем расположении ЭРЭ, микросхем и МСБ в корпусах 3-го и 4-го типов. Элементы с массой до 2 г включительно, как правило, устанавливаются без приклейки, но при условии последующего обволакивания лаком; на лепесток — для регулировочных элементов ячейки.

Элемент должен устанавливаться на печатную плату без зазора при отсутствии незащищенных проводников под ним или при наличии изоляции между печатной платой и корпусом элемента. Изоляция может осуществляться надеванием на корпус элемента трубок из изоляционного материала, нанесением тонкого слоя эпоксидной



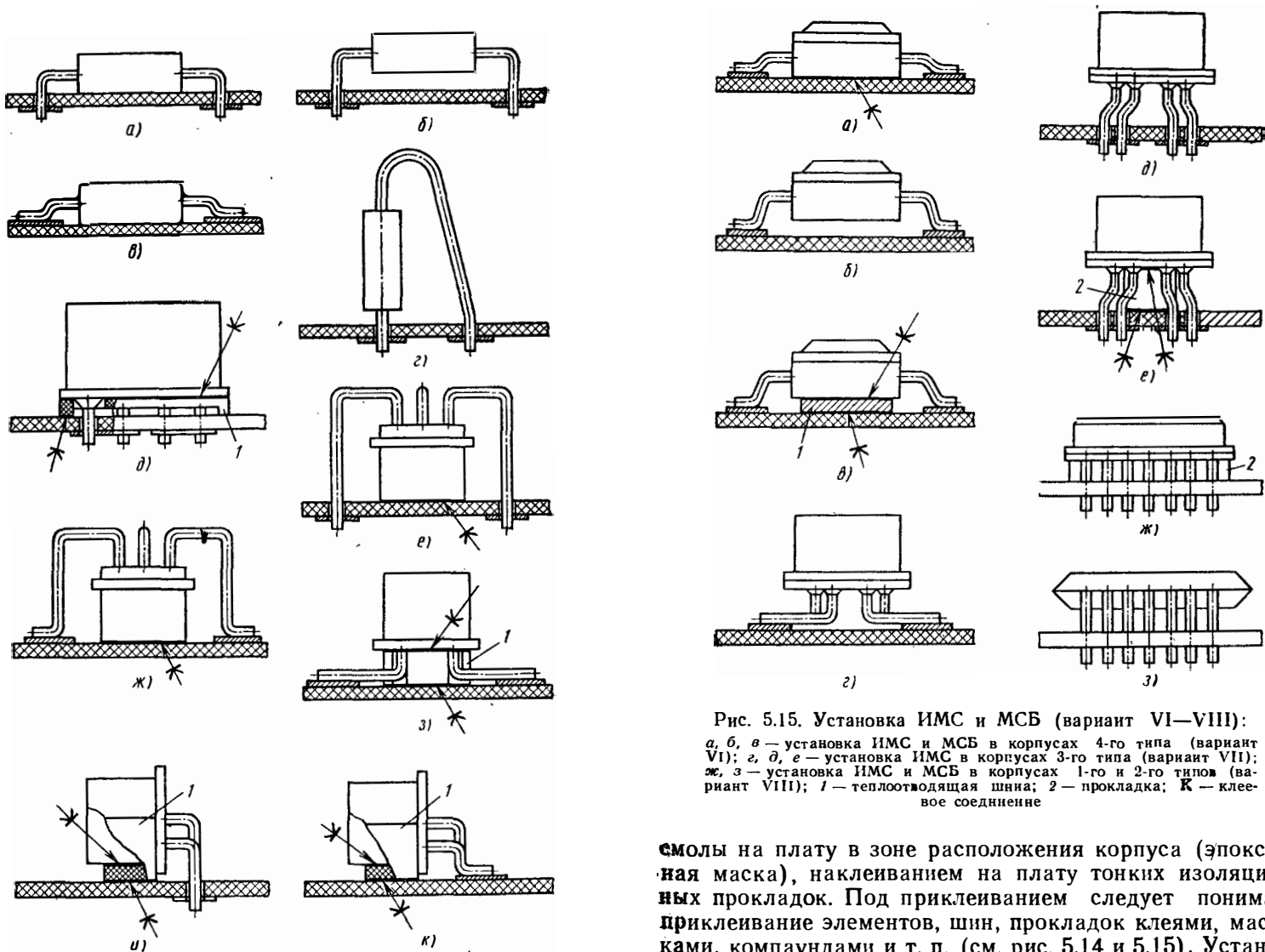


Рис. 5.14. Установка ЭРЭ (вариант I—V):

а, б, в — установка резисторов, конденсаторов, дросселей;  
 г — установка резисторов и конденсаторов; д — установка реле и транзисторов; е, ж, з, и, к — установка транзисторов; 1 — прокладка; К — клеевое соединение

Рис. 5.15. Установка ИМС и МСБ (вариант VI—VIII):

а, б, в — установка ИМС и МСБ в корпусах 4-го типа (вариант VI); г, д, е — установка ИМС в корпусах 3-го типа (вариант VII); ж, з — установка ИМС и МСБ в корпусах 1-го и 2-го типов (вариант VIII); 1 — теплоотводящая шина; 2 — прокладка; К — клеевое соединение

смола на плату в зоне расположения корпуса (эпоксидная маска), наклеиванием на плату тонких изоляционных прокладок. Под приклеиванием следует понимать приклеивание элементов, шин, прокладок клеями, мастиками, компаундами и т. п. (см. рис. 5.14 и 5.15). Установка на печатную плату с зазором допускается для элементов весом не более 1 г.

Так как печатные платы имеют малые расстояния между проводниками, то воздействие влаги может привести к таким ухудшениям сопротивления изоляции, при

которых будет нарушена нормальная работа схемы. Поэтому печатные платы ФЯ, которые будут работать в сложных климатических условиях, необходимо покрывать несколькими слоями лака, например лаком УР-231.

**Компоновочные схемы ФЯ.** Функциональные ячейки классифицируются по следующим признакам в зависимости: 1) от компоновки ячеек в блоке — разъемные,

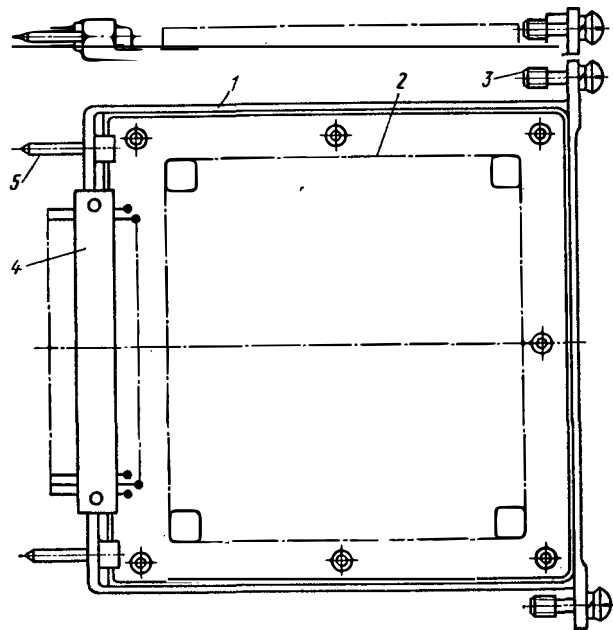


Рис. 5.16. Конструкция разъемной рамочной ячейки:

1 — металлическая рамка; 2 — печатная плата; 3 — невыпадающий винт; 4 — соединитель; 5 — штырь-ловитель

книжные; 2) от силового элемента — безрамочные, рамочные; 3) от количества плат в ячейке — одноплатные, двухплатные, многоплатные.

Обязательными элементами для разъемной конструкции ФЯ (рис. 5.16) являются электрический соединитель и элементы крепления и фиксации. Для внутриблочной электрической коммутации РЭА третьего поколения широко применяются электрические малогабаритные соединители врубного типа (разъемы), обладающие необходимым числом выходных контактов и имеющие надежный электрический контакт в контактных парах. Из

числа рекомендуемых типов электрических соединителей целесообразнее всего применять электрические соединители типов РППМ27, ГРПМ9, ГРПП72, СНП38, СНО59 и СНП34. Самым распространенным является соединитель СНП34, вилка которого обладает вариантами установки на коммутационную печатную плату, под накрутку и струнный проводной монтаж.

К элементам крепления и фиксации ячеек следует отнести различные планки или панели, угольники, рамки, штыри-ловители, скобы, стяжные винты и т. п. Для безрамочной ячейки разъемной конструкции основным элементом крепления является планка, которая устанавливается на печатную плату ячейки (или между печатными платами) с противоположной стороны установки электрического соединителя. Такие планки предназначены для индивидуального крепления ячеек в блоке и выполняются в различных конструктивных модификациях, что диктуется требованием легкосъемности ячеек и видами аппаратуры. Материалом планок, как правило, является алюминиевый сплав АЛ9 или полиамид.

В ячейках рамочной разъемной конструкции (см. рис. 5.16) роль элемента крепления выполняет рамка, создающая необходимую жесткость конструкции ячейки, позволяющая осуществлять крепление ячейки в блоке и одновременно отводящая тепло от корпуса блока. Крепление печатных плат ячеек в рамочной разъемной конструкции осуществляется с помощью винтов, заклепок или резьбовых втулок по углам не менее чем в четырех точках. При необходимости вводятся дополнительные точки крепления в средней части платы, число которых определяется требованиями механической прочности, предъявляемой к аппаратуре. Элементы фиксации ячеек предназначены для ориентирования ячеек в блоках разъемной конструкции и выполняются в виде штырей-ловителей, если они не заложены в разъемах, и направляющих. Штыри-ловители служат для облегчения совмещения ячейки с ответной частью электрического соединителя, выполняются плавающими или с жестким закреплением и располагаются на максимальном расстоянии друг от друга.

Необходимый элемент разъемной ФЯ — ключ для исключения возможности неправильной установки последней. Для этого используют несимметрию конструкции ячейки, разнотолщинность направляющих, но в большинстве случаев ключом ячейки служит ключ разъема, как,

например, в разъеме СНПЗ4, где кодовый штырь с помощью поворота на несколько градусов имеет до 200 различных вариантов и одновременно может выполнять функции ловителя.

Элементы контроля разъемных ячеек предназначены для осуществления контроля и проверки работоспособности ячейки в процессе настройки, эксплуатации и профилактического ремонта. Как правило, элементы контроля устанавливаются на краях ПП ячеек, на планках креп-

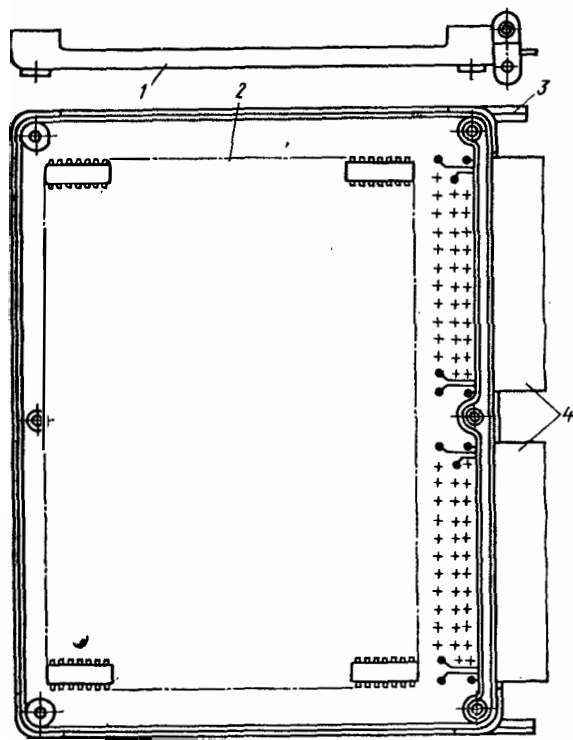


Рис. 5.17. Конструкция книжной рамочной ячейки:  
1 — металлическая рамка; 2 — печатная плата; 3 — приливы для шарнирного соединения ячеек в блоке; 4 — гибкий печатный кабель

ления или в местах, легко доступных для подключения необходимых контрольных приборов. Иногда на планку ячейки устанавливаются органы визуального контроля в виде миниатюрных ламп и органов подстройки переменных резисторов, конденсаторов и потенциометров.

В книжных конструкциях ФЯ (рис. 5.17) перед элементами съема электрических сигналов и элементами крепления и фиксации ставятся другие задачи, так как к блокам книжной конструкции предъявляются требования обеспечения высокой надежности электрических соединений, малых габаритов и массы и не предъявляется требование легкосъемности. Поэтому платы ФЯ в книжных конструкциях оканчиваются, как правило, контактными площадками, заклепками, осажеными контактами, специальными ламелями, закрепленными в колодках и позволяющими многократную подпайку до трех проводов одновременно, или плоскими низкочастотными разъемами типа РПС1-37. Электрические соединения ячеек в блоках таких конструкций выполняют с помощью гибких шлейфов, плоских кабелей, плоских кабельных стволов или монтажных проводов.

Перед элементами крепления и фиксации ФЯ книжной конструкции ставится задача обеспечения шарнирного соединения и гарантированного зазора между ячейками в блоке. В зависимости от конструкции блока в ячейку книжной конструкции может быть введен элемент шарнирного соединения трех типов: а) простой одноосный шарнир (до 60—90° раскрытия платы); б) более сложный шарнир (типа велосипедной цепи, когда между петлями есть еще звено); в) двухосный шарнир (до 180° раскрытия платы). Постоянный зазор между ячейками осуществляется распорно-дистанционными втулками или сухарями, которые устанавливаются в крепежных отверстиях ячейки и предусматривают последующее групповое крепление ячеек в блоке.

Безрамочные ячейки книжной конструкции, как правило, реализуются в виде печатных плат с распорно-дистанционными втулками и элементами шарнирного соединения, которые стягиваются шпильками в пакет, а собранные таким образом блоки устанавливаются в моноблок под общим кожухом или в герметичном приборе с небольшим тепловыделением.

Рамочные ячейки книжной конструкции реализуются в различных модификациях, но наиболее удачным представляется вариант, когда рамка одновременно является несущим элементом для печатной платы и частью будущего кожуха блока, который образуется из стенок собираемых в пакет ячеек. Такая конструкция рамочной ячейки характерна для бортовых низкочастотных негерметичных блоков с малым и повышенным тепловыделе-

нием. Рамки в этом случае выполняются из тонколистового алюминиевого сплава пайкой эвтектическим силумином.

**Общие требования к конструированию сборочных единиц II уровня.** Выбор варианта конструкции блока и компоновки ячеек в нем, а также взаимное расположение других конструктивных зон надо осуществлять, исходя из технических требований, специфичных для разрабатываемой РЭА (надежность, ремонтпригодность, габаритные и установочные размеры, масса, тепловые режимы, условия эксплуатации и т. д.). В основном блоки РЭА конструируются прямоугольно-параллелепипедной формы, за исключением блоков, устанавливаемых в специальные отсеки. Это дает возможность применения автоматизированных методов проектирования и использования типовых технологических процессов сборочно-монтажных и регулировочных работ.

Наиболее трудоемки в процессе проектирования блоков выбор рационального варианта компоновки ячеек в блоке, обеспечение минимальной длины цепей электрической коммутации и нормальных тепловых режимов блоков, а также разработка или выбор базовой несущей конструкции (БНК) блока, которая в свою очередь обеспечивает два первых требования. Причем БНК блоков предназначаются для размещения, механического крепления, защиты от механических перегрузок и внешних воздействий ячеек в блоках, а также блоков в шкафах, стойках и стеллажах. Элементы несущих конструкций должны обеспечивать надежное крепление ячеек с микросхемами, МСБ и другими ЭРЭ и элементами электрической коммутации, минимальную массу, максимальное использование однотипных деталей и их унификацию.

Материалы и покрытия, применяемые для изготовления элементов несущих конструкций блоков, должны выбираться в зависимости от назначения и условий эксплуатации аппаратуры. Элементы несущих конструкций изготавливаются литьем под давлением, штамповкой, прессованием и сваркой профильных материалов, хотя в последнее время широко применяются профильно-сборные конструкции, что обуславливается ростом номенклатуры пресованных профилей и их низкой себестоимостью.

Важную роль на этапе проектирования имеет правильный выбор внутриблочной электрической коммутации с применением прогрессивных методов монтажа, а

также межблочного электрического соединителя, зависящего от метода межблочной коммутации (петлевой, накладной или врубной) и БНК блока, определенной видом аппаратуры. Для электрических межблочных соединителей наиболее часто используют соединители следующих типов: 2РМ, 2РМД, РР-15, МР1, РС, ГРПМ2, ГРПМ3, ГРПМ9.

Кроме того, на этапе проектирования необходимо прорабатывать вопросы электрической защиты блоков, включая заземление и экранирование, вопросы тепловых режимов, герметизации и виброизоляции блоков.

**Компоновочные схемы блоков.** Под компоновкой блоков следует понимать взаимную ориентацию ячеек или других конструктивных зон (электрической коммутации, механических элементов и т. д.) в заданном объеме блока. Для определения факторов, влияющих на габариты и конструктивное построение блоков, следует рассмотреть наиболее часто используемые в РЭА разъемный и книжный варианты конструкции блоков.

Требования по механическим воздействиям влияют на выбор зазоров между ячейками с учетом деформации ПП ячеек, элементов несущих конструкций (рамки, ребра жесткости и т. д.), элементов крепления (приливы, кронштейны, шарниры, бобышки), элементов конструкции корпуса блока и элементов крепления блоков в стойке, шкафу и др. По климатическим требованиям условия эксплуатации оказывают влияние на вариант исполнения корпуса блока: герметичный, негерметичный. Повышение требований по механическим и климатическим воздействиям на аппаратуру приводит к увеличению вспомогательного объема, а значит, и всего блока.

Следующим фактором, влияющим на габаритные размеры блока, является также применяемая элементная база и число элементов, размещаемых в блоке, но широко выпускаемые микросхемы различной степени интеграции в сочетании с МСБ позволяют пока даже при значительном увеличении числа элементов в принципиальной электрической схеме блоков сокращать их габариты, что достигается повышением плотности упаковки элементов. Дальнейшее повышение плотности упаковки связывается с увеличением степени интеграции микросхем и МСБ и достижениями в функциональной микроэлектронике.

Элементы электрических соединений в блоках влия-

ют на размеры зон электрической коммутации, которые разделяются на внутриблочные и межблочные. *Внутриблочная* зона образуется элементами электрической коммутации между ячейками внутри блока, *межблочная* — элементами электрической коммутации между блоками в шкафу, стойке, пульте и т. д. с учетом объемов, занимаемых частью межблочных электрических соединителей, входящих в полный объем блоков. Межблочные электрические соединения могут осуществляться: жгутовыми соединениями с помощью объемных проводов, разъемами, соединителями и гибкими шлейфами или гибкими печатными кабелями и коммутационной печатной платой. Внутриблочные электрические соединители занимают в блоках зону, равную 25—35 мм, что увеличивает одну из сторон блока в зависимости от выбранного варианта компоновки. Жгутовые соединения, ГПК и коммутационные ПП увеличивают габаритные размеры корпуса блока на 15—20 мм в одном или в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Для обеспечения в блоках РЭА нормального теплового режима применяются различные системы охлаждения в зависимости от температуры окружающей среды, максимально допустимой температуры ЭРЭ, варианта исполнения корпуса блока (герметичный, негерметичный), конструкции и компоновки ячеек в блоке. Воздушная система охлаждения при естественной конвекции требует величину зазоров между ячейками 6—8 мм для обеспечения нормального теплового режима внутри блока. Воздушная система охлаждения с принудительным охлаждением позволяет сокращать зазоры между ячейками до 2 мм, но вызывает увеличение объема блока на 10—15% за счет установки вентилятора или воздуховодов. Кондуктивная система охлаждения, т. е. теплостоки в виде радиаторов, теплоотводящих шин, тепловых трубок, оребрения корпусов блоков и т. д., увеличивает габаритные размеры блоков на 20—25% и влияет на размеры их несущих конструкций. Кроме того, на габаритные размеры влияет метод изготовления элементов несущих конструкций блоков (штамповка, литье, прессование, механическая обработка).

Таким образом, все рассмотренные факторы так или иначе влияют на выбор варианта конструкции блоков и соответственно на его габаритные размеры, а поэтому правильность выбранной конструкции в процессе эскизной проработки должна определяться комплексом абсо-

лютных (объем, масса блока, надежность и т. д.) и относительных (коэффициент использования полезной площади, объема, массы и т. п.) конструктивных показателей, а также коэффициентом плотности упаковки.

При этом особое внимание следует обратить на габаритные размеры блоков и конструктивное исполнение вариантов компоновки (I—VI) ячеек и зоны внутриблочной электрической коммутации в полезном объеме блока (рис. 5.18). Как видно из рисунка, полезный объем блока  $V_6$  можно условно представить в виде двух объемов: объема  $V_1$ , занимаемого ФЯ, и объема  $V_2$ , занимаемого под элементы электрического соединения и их электрический монтаж.

Для рассматриваемых вариантов компоновки эти объемы можно выразить следующим образом:

$$V_1 = LH(B - B_K); V_2 = LHB_K \text{ для вариантов I и II; } (5.8)$$

$$V_1 = L(H - H_K)B; V_2 = LH_K B \text{ для вариантов III и IV; } (5.9)$$

$$V_1 = (L - L_K)HB; V_2 = L_K HB \text{ для вариантов V и VI. } (5.10)$$

Из рассмотрения (5.8) — (5.10) видно, что наиболее рациональны варианты компоновки V и VI, а наименее — варианты I и II, так как в блоках РЭА, как правило,

$$L > H, L > B, H \geq B. (5.11)$$

Варианты компоновок V и VI для различных видов РЭА приведены на рис. 5.19 и 5.20.

## § 5.4. Компоновочные схемы РЭА

Радиоэлектронная аппаратура настолько многообразна по своему назначению и конструктивному выполнению, что разработка компоновки невозможна без составления компоновочной схемы для каждой конкретной категории РЭА. Компоновочные схемы РЭА прежде всего определяются конструктивно-компоновочными особенностями объекта установки аппаратуры, а высокое качество и эффективность РЭА связаны с обеспечением совместимости аппаратуры с объектом установки.

Компоновочная схема показывает количество составных частей в РЭА (блоков, приборов), их расположение, способы и приемы их объединения в единую конструкцию, обеспечивающие механическую прочность конструкции, высокую ремонтпригодность, защиту от климатических и механических воздействий. Сложная современная РЭА идет по пути создания многоблочных конструкций, поэтому компоновочные схемы РЭА можно классифицировать по способу соединения отдельных частей аппаратуры в единую конструкцию. Согласно такой клас-

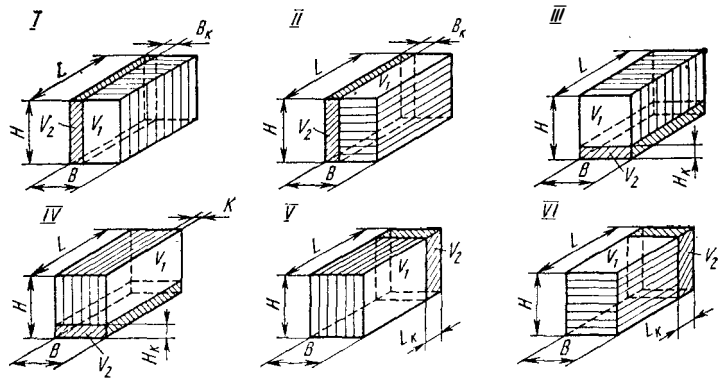


Рис. 5.18. Схемы компоновки блоков:

$L, H, B$  — длина, высота и ширина блока;  $L_k, H_k, B_k$  — части блока, занимаемые элементами внутриблочного электрического соединения (коммутацион)

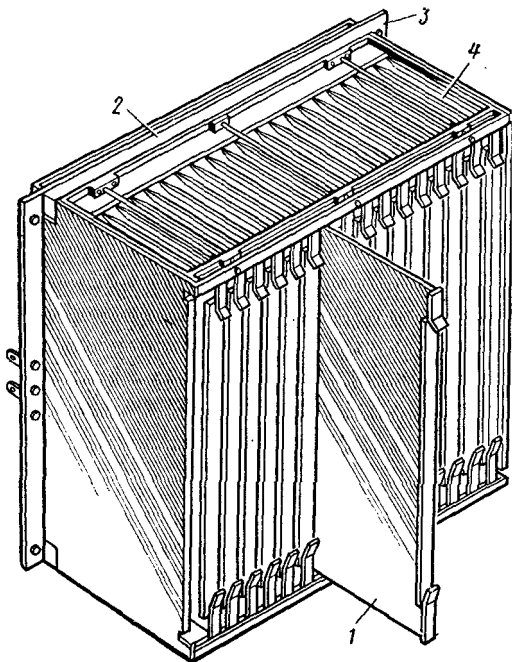


Рис. 5.19. Блок разъемной конструкции с безрамочными ячейками для наземной аппаратуры:  
1 — безрамочная ячейка с розеткой соединителя СМП34; 2 — стяжка; 3 — задняя панель; 4 — направляющая

сификации компоновку РЭА можно выполнить по двум основным схемам: децентрализованная (разбросанная) компоновка; полностью централизованная компоновка.

Примеры децентрализованной и централизованной компоновок показаны на рис. 5.21.

Децентрализованная компоновочная схема позволяет относительно легко разместить составные части РЭА на объекте. При таком размещении несложно решить вопросы электромагнитной совместимости блоков и приборов, расположив их на значительном расстоянии друг от

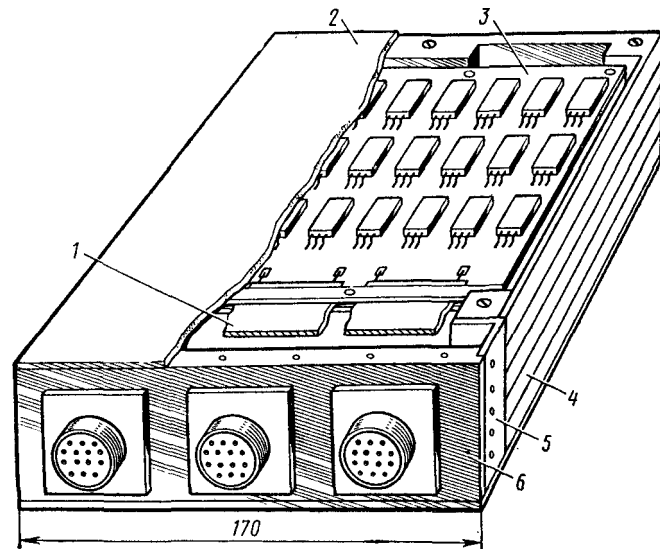


Рис. 5.20. Блок книжной конструкции с рамочными ячейками для бортовой РЭА:

1 — гибкий кабель; 2 — крышка; 3 — печатная плата ячеек; 4 — рамочная ячейка; 5 — угольник; 6 — лицевая панель

друга. Например, при децентрализованной компоновке не требуется тщательная экранировка приемника и передатчика, которые могут быть расположены в разных отсеках объекта. Однако такой способ компоновки имеет и существенные недостатки: соединительные жгуты и кабели имеют значительную длину, что увеличивает массу и габариты аппаратуры, а кабели создают дополнительные потери для сигналов; каждый блок или прибор должен иметь отдельные устройства охлаждения, виброзащиты и т. д.; сложно произвести полный демонтаж системы.

При *централизованной* компоновке все составные части РЭА располагают в одном радиоотсеке. Блоки и приборы компонуют в единую конструкцию с помощью шкафов, специальных этажерочных стоек и т. д. Демонтаж системы в этом случае осуществить значительно легче, длина и количество соединительных жгутов и кабелей сведены к минимуму, системы охлаждения и виброзащиты выполняются для всей системы в целом, что позволя-

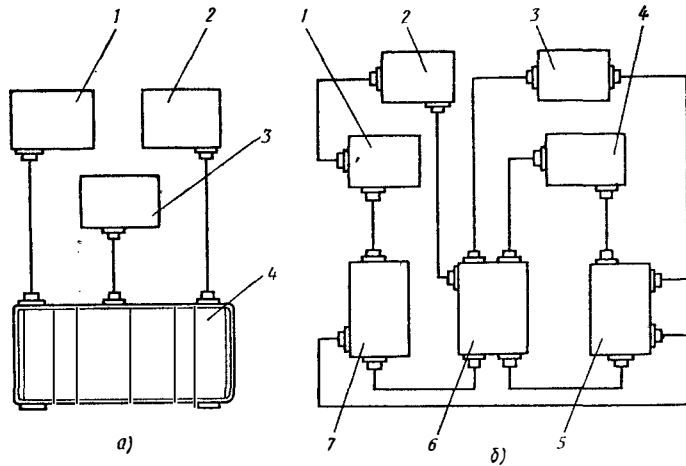


Рис. 5.21. Компоновочные схемы РЕА:

*a* — централизованная: 1 — антенны, 2 — пульт управления; 3 — выносные датчики; 4 — блоки РЕА; *б* — децентрализованная: 1 — антенны; 2 — выносные датчики; 3 — пульт управления; 4 — блок отработки информации; 5 — приемник; 6 — блок питания; 7 — передатчик

ет улучшить их эффективность. Но централизованной компоновке присущи свои недостатки: требуется более тщательная экранировка, особенно если приемник и передатчик расположены в одном кожухе; вызывает трудности компоновка на объекте; уменьшается надежность изделия, так как при выходе из строя общих систем охлаждения, виброзащиты, герметизации нарушается работа всего изделия. Следовательно, каждой компоновочной схеме присущи свои преимущества и недостатки.

В настоящее время большое распространение получил способ централизованной компоновки с расположением всех частей РЕА, кроме входных и управляющих устройств, в одном отсеке объекта. Этому способствовал переход на микроэлектронную элементную базу, давший возможность значительно уменьшить габариты РЕА.

Однако выбор централизованной или децентрализованной компоновки в значительной степени определяется особенностями объекта установки РЕА, причем тем в большей степени, чем больший объем и массу на объекте занимает РЕА. При компоновке необходимо тщательно учитывать форму и габариты того отсека, который отводится под установку РЕА. Объект установки аппаратуры оказывает настолько сильное влияние на компоновочную схему, что рассматривают компоновочные схемы РЕА

отдельно для каждой категории аппаратуры: наземной, бортовой и морской. Большое удобство для компоновки РЕА всех категорий на объектах установки дает стандартизация и унификация размеров блоков, стоек, шкафов и других несущих конструкций. Для всех категорий аппаратуры разработаны и используются при проектировании государственные и отраслевые стандарты, стандарты предприятий, руководящие материалы, которые устанавливают типоразмерные ряды габаритов приборов, блоков, шкафов, стоек. Типоразмеры сводятся в таблицу и в каждом конкретном случае

типоразмер выбирают при конструировании в зависимости от схемно-конструктивных решений. Если в общем случае принять высоту прибора или блока  $H$ , длину  $L$ , а ширину  $B$  (рис. 5.22), то для различных категорий аппаратуры один из размеров принимается постоянным, а два другие изменяются по определенному закону. Например, для блоков РЕА, устанавливаемых на самолетах гражданской авиации, высота блока  $H$  неизменна, длина  $L$  имеет два фиксированных значения, а ширина блока  $B$  имеет ряд типоразмеров, рассчитанный таким образом, чтобы обеспечить равномерное увеличение объема блока. Бортовая аппаратура другого назначения имеет целый ряд типоразмеров по длине блока, восемь типоразмеров по высоте блока, а ширина блока имеет фиксированное значение. Стандартизация размеров блоков позволяет компоновать аппаратуру как в вертикальных

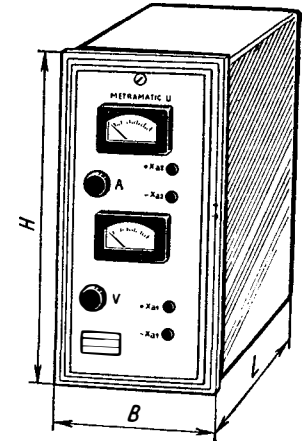


Рис. 5.22. Габаритные размеры блока РЕА

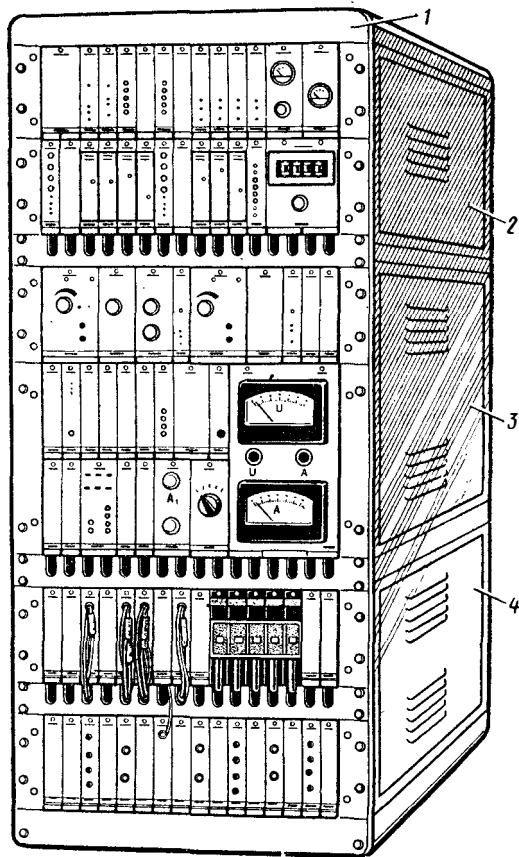


Рис. 5.23. Компоновка блоков в вертикальной стойке:

1 — корпус стойки; 2 — двухэтажные секции; 3, 4 — трехэтажные секции

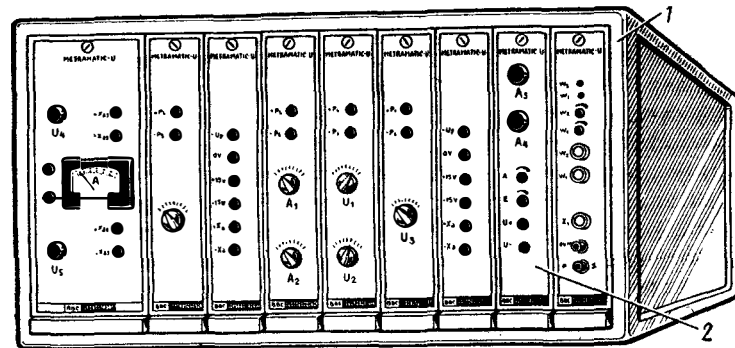


Рис. 5.24. Компоновка блоков на горизонтальной раме:

1 — корпус рамы; 2 — легкосъемные блоки

### § 5.5. Внешняя компоновка РЭА

К внешней компоновке относится выбор формы, размеров и массы отдельных частей РЭА, расположение органов управления, регулировки и контроля, выбор соответствующих индикаторов, цветовой гаммы в оформлении аппаратуры. Внешняя компоновка тесно связана с назначением РЭА и объектом ее установки. Однако самым значительным фактором является наличие человека-оператора. В РЭА существует информационная связь между аппаратурой и человеком-оператором: во время работы РЭА огромный поток информации поступает от РЭА к человеку-оператору и от человека-оператора к РЭА. Если для бытовой РЭА этот поток можно считать почти односторонним (от РЭА к человеку), то для специальной аппаратуры это двусторонняя связь. Поэтому вопросы внешней компоновки бытовой радиоаппаратуры в первую очередь связаны с ее эстетическим оформлением, а для специальной аппаратуры при важности эстетического внешнего оформления необходимо учитывать взаимосвязь человека-оператора с аппаратурой, так как в противном случае могут резко снижаться тактико-технические показатели РЭА. Решение этих вопросов связано с использованием инженерной психологии.

Внешнюю компоновку РЭА прежде всего определяет формообразование. Форма собственно РЭА всегда объемная, хотя отдельные ее элементы могут быть плоски-

стойках, так и на горизонтальных рамах, т. е. использовать вертикальную и горизонтальную схемы компоновки (рис. 5.23 и 5.24).

В каждом конкретном случае для разработки компоновочной схемы необходимо не только тщательное изучение требований технического задания и технических условий, но и подробное знакомство с объектом установки и его особенностями.



ми. Основными свойствами формы являются геометрический вид, величина, положение в пространстве, масса, фактура и цвет поверхности. Свойства формы взаимосвязаны и, кроме того, зависят от восприятия человека. Например, легкий блок большого объема будет казаться тяжелее, чем тяжелый блок небольшого объема. Величина формы всегда определяется в зависимости от ее соотношения к другой форме или к человеку.

Большое значение во внешнем оформлении имеет цвет, обладающий свойством изменять восприятие размеров предметов и дающий возможность корректировать дефекты формы. Так, белый и желтый цвета — увеличивают размеры, а синий, коричневый и черный — уменьшают. При этом необходимо соблюдать пропорцию величины цветных поверхностей: более яркие цвета должны занимать меньшую площадь. При создании цветовых контрастов увеличивается различительная чувствительность глаз оператора. Например, контрастными сочетаниями цветов являются: желтый (цвет фона) — черный (цвет изображения); белый (цвет фона) — синий, зеленый, черный, красный (цвета изображения); красный (цвет фона) — зеленый (цвет изображения) и др. Правильный выбор цветовой гаммы не только усиливает эстетическое воздействие изделия, но и способствует повышению производительности труда оператора.

Внешняя компоновка должна создаваться за счет гармонического распределения и сочетания массы, формы, линий и цвета. Значительно влияет на композицию контраст, пропорциональность и симметрия, при этом композиция совсем не обязательно должна иметь абсолютную симметрию. Важным вопросом является правильное определение композиционного центра, в качестве которого может быть использован основной индикатор, блок или прибор.

Качество внешней компоновки сказывается на человеке-операторе, поэтому при решении задач внешней компоновки необходимо учитывать «параметры» и возможности среднего человека. Повышение требований к надежности работы РЭА заставляет рассматривать и надежность работы оператора. Человек-оператор участвует в процессе приема и переработки информации, поэтому необходимо решать вопросы о количестве информации, о «пропускной» способности и скоростях реакций человека, о точности восприятия и т. д. Все эти задачи должны быть решены согласованием РЭА с возможно-

стями человека-оператора, а не «подгонкой» человека под возможности РЭА.

Для РЭА с большой интенсивностью информационных потоков важное значение имеет компоновка пультов управления и передних панелей приборов. Размеры пультов управления должны согласовываться с «размерами» среднего человека-оператора. При компоновке пультов пользуются компоновочной моделью оператора, которая разработана с учетом средних «размеров» человека.

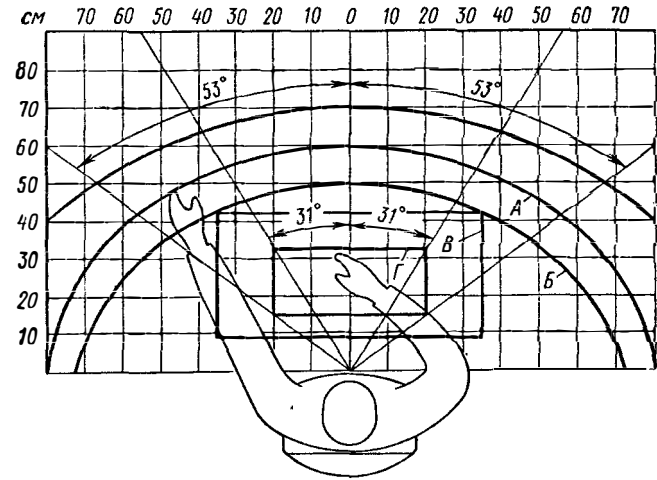


Рис. 5.25. Зоны досягаемости и видимости в горизонтальной плоскости

На пультах управления и передних панелях приборов располагается определенное количество органов управления и регулировки, индикаторов, сигнальных устройств. Чем выше интенсивность информационных потоков, тем больше насыщенность органами управления и индикаторами.

При размещении органов управления и индикаторов прежде всего необходимо учитывать, что для оператора существуют зоны на пультах управления, где легко и удобно пользоваться индикаторами и производить управление аппаратурой, а есть зоны, выходящие за пределы видимости оператора. На рис. 5.25 показаны зоны досягаемости в горизонтальной плоскости. Если оператор не изменяет положения туловища, то зона А соответ-

вует максимальной досягаемости пальцев при вытянутом плече, а зона *B'* соответствует удобной досягаемости ладони руки. В таком же положении оптимальная зона видимости оператора в горизонтальной плоскости при фиксированном взгляде составляет  $62^\circ$ , а при фиксированном положении головы —  $106^\circ$ . В этой зоне оператор может легко определить положение стрелки индикатора. Наиболее удобной зоной для точной ручной работы является зона *G*, а для грубой — зона *B*, поэтому наиболее важные и часто употребляемые органы управления и индикаторы должны располагаться в оптимальных зонах досягаемости и видимости. Органы управления и индикаторы группируются таким образом, чтобы между каждым органом управления и соответствующим ему индикатором существовала правильная взаимосвязь. При группировании органов управления и индикаторов могут использоваться два принципа: группирование по функциональному признаку подразумевает объединение идентичных по своим функциям или используемых совместно органов управления и индикаторов; группирование по методу последовательного размещения, когда органы управления и индикаторы располагаются в порядке последовательности их использования слева направо и сверху вниз.

При расположении органов управления и регулировки надо учитывать, что работа между правой и левой рукой оператора должна распределяться равномерно, причем правой рукой должны выполняться более ответственные операции, требующие точности и силы.

В связи с большим многообразием внешней компоновки РЭА в каждом конкретном случае необходимо очень внимательно рассматривать техническое задание на разработку и специфические требования, предъявляемые к конкретной аппаратуре.

## ГЛАВА 6

### КОНСТРУИРОВАНИЕ РЭА ЧЕТВЕРТОГО ПОКОЛЕНИЯ

#### § 6.1. Основные направления микроминиатюризации и задачи микроэлектроники

К основным проблемам современного конструирования РЭА относятся выбор варианта конструкции, обеспечение надежности и эффективности производства, нормального теплового режима и вибропрочности конструк-

ции, унификация и стандартизация, комплексная микроминиатюризация. Проблема комплексной микроминиатюризации (КММ) возникла сравнительно недавно. Раньше всегда существовала проблема микроминиатюризации, основной целью которой являлось уменьшение материалоемкости конструкций.

Микроминиатюризация на современном этапе — это системный подход к проектированию аппаратуры с применением ИМС, групповых процессов цикла изготовления ИМС, машинных методов выпуска документации, производства и контроля электронной аппаратуры. В широком смысле комплексная микроминиатюризация означает системный подход к применению в аппаратуре средств микроэлектроники, а в прикладном смысле КММ — метод создания аппаратуры, при котором все ее узлы, блоки и устройства выполнены на базе ИМС, БИС и других изделий микроэлектронной техники. Так, например, генераторы и усилители СВЧ выполняются на микрополосковых МСБ с бескорпусными СВЧ ИМС, транзисторами и диодами; усилители радиочастот — на МСБ с бескорпусными линейными ИМС и интегральными пьезофильтрами; аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи — на МСБ с бескорпусными ИМС операционных усилителей и компараторов; цифровые вычислители — на МСБ с БИС микропроцессоров; устройства силовой электроники и вторичные источники питания — на силовых МСБ и т. д.

Основной задачей КММ при все возрастающей сложности аппаратуры является обеспечение ее высокой надежности, малых масс и объемов, повышенных эксплуатационных характеристик, технологичности и серийно-способности. Выполнение, этих требований возможно в первом приближении в том случае, если практически все узлы, блоки и устройства, входящие в более сложные комплексы, имеют соизмеримые значения основных конструктивно-технологических показателей (надежность, масса, объем, процент выхода годных, стоимость и т. п.). Если сгладить все уровни основных показателей устройств РЭА не удастся, то можно утверждать, что задача КММ решается не полностью, а выбранный вариант конструкции нельзя считать оптимальным.

Примерами неполного решения вопросов КММ являются все еще существующие диспропорции по основным показателям в конструкциях аппаратуры, такие, как значительные «доли» масс и объемов кабельной сети и

систем охлаждения в многоблочных конструкциях, элементов коммутации (разъемов и жгутов) — в блоках, несущих конструкций (плат, рамок, обечаек) — ФЯ и т. д. Эти диспропорции приводят к значительным дезинтеграциям основных показателей конструкций при переходе от уровня элементной базы к более высоким компоновочным уровням.

Значительное уменьшение дезинтеграции по определяющим параметрам и является основной задачей КММ. К основным направлениям КММ относятся: дальнейшее развитие и внедрение в практику проектирования, конструирования и технологии изготовления новых принципов схмотехники (микросхмотехники); разработка новых принципов компоновки РЭА; совершенствование и развитие новых способов и методов коммутации; повышение эффективности систем теплопередачи при одновременном уменьшении их масс и объемов; разработка и промышленное освоение новых видов прочных, жестких и теплопроводящих материалов несущих конструкций; дальнейшая автоматизация проектных, конструкторских работ и технологии производства.

## § 6.2. Элементная база РЭА четвертого поколения

Отличительной чертой конструкций РЭА четвертого поколения является применение в них БИС, СБИС, функциональных компонентов и микросборок, которые составляют основу элементной базы четвертого поколения. Причем, если БИС, СБИС и функциональные компоненты предназначены для широкого применения и являются покупными при разработке конструкций более высокого уровня, то микросборки являются микросхемами частного применения и разрабатываются, как правило, разработчиками соответствующей РЭА. Поэтому конструирование микросборок рассмотрим подробнее.

Основой технологического построения микросборок является технология пленочных ИМС. В пленочных ИМС элементы создаются осаждением тонких (тонкопленочные ИМС) или толстых (толстопленочные ИМС) пленок на специальные платы из диэлектрических материалов — подложки. Подложка служит механическим основанием ИМС и будучи диэлектриком изолирует ее элементы. На основе напыленных пленок в настоящее время изготавливаются только пассивные элементы (в основном резисторы и конденсаторы). Пленочные схемы, допол-

ненные активными элементами (диодами, транзисторами, полупроводниковыми ИМС), которые крепятся на подложке методом навесного монтажа, составляют гибридные ГИС или микросборки.

Такая технология изготовления МСБ, при которой пассивные и активные элементы создаются по двум независимым друг от друга циклам, приводит к ряду преимуществ, которые обусловили широкое производство и использование ГИС и МСБ, характеризующихся простотой изготовления, относительно малой трудоемкостью, непродолжительностью производственного цикла. Многоуровневое расположение пассивных элементов и соединений и использование в качестве активных элементов полупроводниковых БИС расширяют возможности схмотехнической разработки при создании БГИС и сложных микросборок.

Бескорпусные полупроводниковые ИМС и компоненты. В настоящее время разработка полупроводниковых микросхем в корпусах сопровождается, как правило, разработкой их аналогов в бескорпусном варианте, а бескорпусные полупроводниковые ИМС, транзисторы, диоды и другие детали образуют элементную базу гибридных микросхем и микросборок, и без анализа их конструкций трудно рассматривать конструкции ГИС и МСБ.

Как правило, конструкция бескорпусных элементов имеет прямоугольную, а чаще квадратную форму, что более удобно с точки зрения оптимальной компоновки деталей на плоскости платы. Присоединительные элементы бескорпусных компонентов весьма разнообразны, но в общем случае подразделяются на четыре группы: I группа — гибкие (проводочные) выводы; II группа — ленточные (балочные или паучковые) выводы; III группа — жесткие (шариковые или столбиковые) выводы; IV группа — безвыводные компоненты (рис. 6.1). Недостатком компонентов с гибкими выводами является трудность автоматизации процессов их монтажа и сборки в составе ГИС и МСБ. Компоненты с балочными выводами дороги, но позволяют автоматизировать сборку, контролировать ее качество, увеличивать плотность монтажа. Применение компонентов с шариковыми выводами затрудняет контроль процесса сборки, но резко увеличивает плотность монтажа и возможность автоматизации сборки.

Вид выводов определяет вид установки бескорпусно-

го изделия в ГИС. Существует девять вариантов установки бескорпусных ЭРЭ, наиболее характерные из которых приведены на рис. 6.2, а—г.

Жесткие выводы компонентов осуществляют одновременно функции механического крепления и электрического присоединения. С помощью гибких выводов осуществляется только электрическое присоединение, а механическое крепление производится с помощью приклеивания к коммутационной пленочной плате. В резисторах и конденсаторах в качестве жестких выводов используются также наплывы припоя. Такие изделия имеют луженые припоем боковые стороны, что позволяет электрически и механически присоединять их к контактным площадкам напылом припоя. Этот способ крепления применяется при толстопленочной технологии изготовления коммутационной платы.

Разновидностью бескорпусной ИМС с шариковыми выводами является ИМС на ленте-носителе (рис. 6.3), укрепленная методом термокомпрессии на фольгированной полиимидной пленке. По краям и в центре с определенным шагом лента перфорирована и напоминает обычную киноленту с кадрами. Установка ИМС на ленту проводится в «окно» кадра, куда приходят и привариваются к шариковым выводам «паукообразные» печатные проводники. Контактные площадки в средней зоне кадра используются для последующей их приварки к контактным площадкам подложки МСБ, печатной платы или внутренним выводам при установке в корпус ИМС.

Преимуществом таких ИМС являются высокоавтоматизированные процессы установки ИМС на ленту-носитель, сматывание ленты в рулон, контроль ИМС в рулоне, вырезание средней зоны ленты с ИМС из кадра рулона и установка ИМС на ленте-носителе в корпус микросхемы или на МСБ. Недостаток — увеличение установочной площади ИМС до размеров площади бескорпусной ИМС с проволочными выводами и больше (9—12 мм).

**Подложки.** Подложка выполняет роль основания, на поверхности которого формируются по заданному рисунку пленочные элементы ГИС, поэтому к конструкции и материалу подложки предъявляются требования, вытекающие из необходимости обеспечения заданных электрических параметров ГИС, ее надежности и особенностей технологии изготовления пассивных элементов. Материал подложки должен обладать: высоким сопротивлением изоляции, низкой диэлектрической проницаемо-

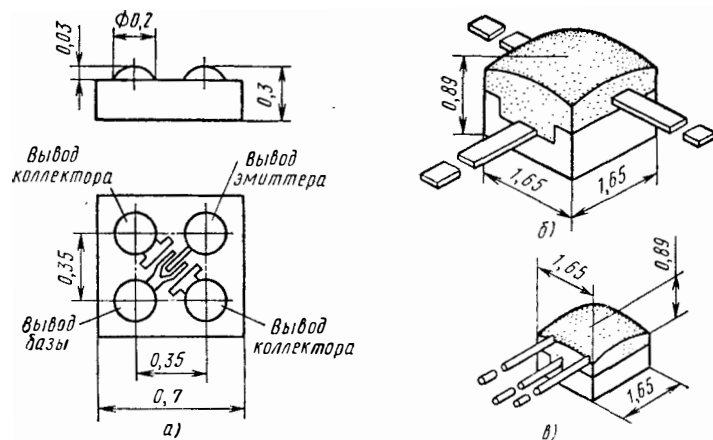


Рис. 6.1. Бескорпусные транзисторы:  
а — с шариковыми; б — балочными; в — гибкими выводами

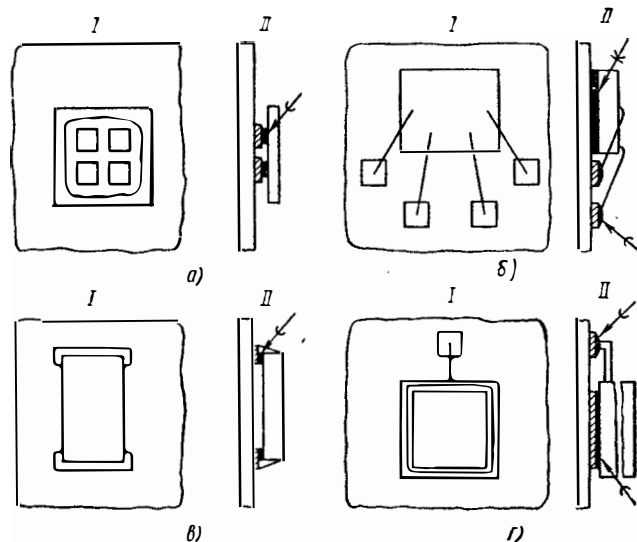


Рис. 6.2. Варианты крепления и присоединения бескорпусных электрорадиоэлементов:

I — вид сверху; II — вид сбоку; а — кристалл с шариковыми выводами; б — кристалл с гибкими выводами, крепящийся клеем; в — конденсатор, крепящийся пайкой, с наплывами припоя; г — конденсатор, крепящийся пайкой, с лепестковым выводом

стью и низким тангенсом угла диэлектрических потерь для обеспечения электрической развязки между элементами; высоким коэффициентом теплопроводности для эффективной передачи теплоты от тепловыделяющих элементов к корпусу ГИС; высокой механической прочностью и способностью к обработке (разделение на суб-подложки, термокомпрессия, пайка, полировка и т. д.); незначительно различающимся температурным коэффи-

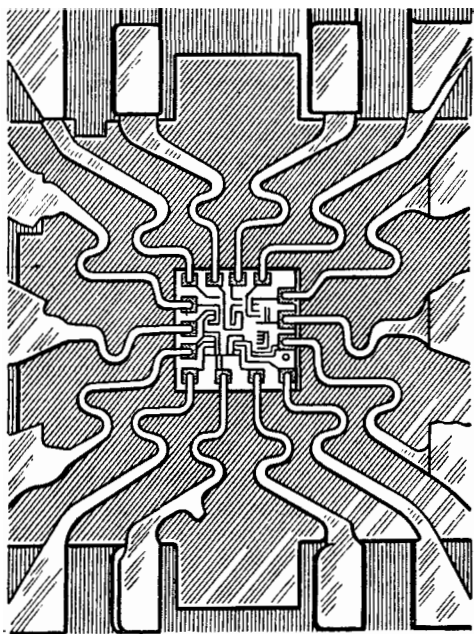


Рис. 6.3. ИМС на ленте-носителе

циентом линейного расширения (ТКЛР) с материалом наносимых пленок; обеспечивать хорошую адгезию осаждаемых пленок к подложке.

Перечисленные требования к подложкам являются общими для тонко- и толсто пленочных ГИС, кроме адгезии: для тонких и толстых пленок необходимая шероховатость поверхности существенно различается.

По совокупности диэлектрических и механических свойств наиболее приемлемым материалом подложек для маломощных тонкопленочных ГИС является ситалл

СТ50-1. Основным недостатком ситалла является низкая теплопроводность, поэтому в случае повышенного тепловыделения в ГИС применяют подложку из керамики «Поликор», а для резистивно-проводниковых МСБ с повышенными требованиями к допускам пассивных элементов — подложку из лейкосапфира.

В толсто пленочных МСБ в основном применяют высокоглиноземистую керамику 22ХС (96%  $Al_2O_3$ ) с большой температурой размягчения, так как формирование толсто пленочных элементов производится при 900 °С. Основные характеристики материалов подложек представлены в табл. 6.1.

Габаритные размеры подложек стандартизованы. Обычно на стандартной подложке групповым методом изготавливается несколько плат пленочных ГИС. Безотходное деление стандартной подложки 96×120 мм на 2, 3, 4, 6, 8, 12 и более частей дает нормализованный ряд типоразмеров плат. Рекомендуемые к применению типоразмеры плат соответствуют посадочным местам стандартных корпусов: 48×60, 30×48, 24×30, 20×24, 16×20, 12×16, 10×16, 10×12 мм. Толщина подложек 0,35—1,6 мм.

**Материалы пленочных элементов. Резисторы.** Тонкопленочные пассивные элементы и межсоединения изготавливаются методами катодного или ионно-плазменного распыления соответствующего материала масочным или фотолитографическим способом. Основные требования к материалам, используемым для тонкопленочных резисторов: широкий диапазон необходимых удельных сопротивлений слоя (10—10<sup>4</sup> Ом/□) и низкий температурный коэффициент сопротивления  $TKR$  (менее 10<sup>-4</sup> °С<sup>-1</sup>). Материалы для тонкопленочных резисторов можно разделить на три группы: металлы, металлические сплавы, металлокерамические смеси — керметы.

Толсто пленочные элементы создают нанесением соответствующих паст на подложки методом трафаретной печати и последующего их вжигания. Материалами для пассивных элементов и межсоединений служат пасты, состоящие из трех компонентов: порошок стекла-фритта, наполнитель и связующее вещество. Резистивные пасты должны обеспечивать возможность получения на их основе пленок с удельным сопротивлением слоя, изменяющимся от 10 до 10<sup>5</sup> Ом/□. Наполнителями для резистивных паст, как и для проводящих, являются благородные металлы — золото, платина, серебро, палладий и их сме-

Параметр материалов подложек	Материал			
	Ситалл СТ50-1	Лейкосапфир	Керамика	
			Полгидор	22ХС (96% $Al_2O_3$ )
Класс чистоты обработки поверхности	13—14	14	12—14	12
Удельное сопротивление, Ом·см	$10^{13}$ — $10^{14}$	$10^{11}$	$10^{14}$	$10^{16}$
Относительная диэлектрическая проницаемость	5—8,5	8,6	10,5	10,3
Диэлектрические потери на частоте $10^6$ Гц	$20 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$18 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$
Теплопроводность, Вт/(м·°C)	1,5	1,5	30—45	10
Т.К.ЛР, °C <sup>-1</sup> (в интервале температур, °C)	$(50 \pm 2) \cdot 10^{-7}$ (20—300)	$(50 \pm 2) \cdot 10^{-7}$ (20—300)	$(70-75) \cdot 10^{-7}$ (20—800)	$(75 \pm 5) \cdot 10^{-7}$ (20—900)
Типовое значение поля допуща на удельное сопротивление, %	20	20	30	30

си. При этом сопротивление пленок варьируется изменением процентного содержания наполнителя. Наиболее часто используемые материалы для резисторов представлены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Параметр	Тонкие пленки			Толстые пленки
	Нихром	РС-3710	Кермет К50-С	ПР
Сопротивление квадрата резистивной пленки, Ом/□ ТКР, $10^{-6}/^{\circ}C$ в интервале температур $(-60 \div +125)^{\circ}C$	10—50	3000	500—10 000	5—50 000
Максимально допустимая удельная мощность рассеяния, Вт/см <sup>2</sup>	—225	—300	+300, —500	±800
	2	2	2	30—80

**Конденсаторы и межслойная изоляция.** Тонкопленочный конденсатор имеет трехслойную структуру металл — диэлектрик — металл, расположенную на изолирующей подложке. Основными параметрами диэлектрических материалов для конденсаторов является удельная емкость  $C_{уд} = \epsilon_0 \epsilon / d$ , определяемая диэлектрической постоянной  $\epsilon \epsilon_0$  и толщиной слоя диэлектрика  $d$ , и электрическая прочность  $E_d$ . Для обеспечения диапазона емкостей  $10-10^6$  пФ требуются диэлектрические постоянные, примерно равные 0,5—50. Электрическая прочность диэлектрического материала определяет напряжение пробоя  $U_d = E_d d$ , а следовательно, и диапазон рабочих напряжений конденсатора.

Диэлектрические материалы, используемые для тонкопленочных конденсаторов, представляют собой окислы полупроводников и металлов. Из окислов полупроводников наибольшее распространение в технологии тонкопленочных ГИС получили монооксид кремния SiO и монооксид германия GeO, имеющие высокие диэлектрические постоянные. Среди окислов металлов наибольший интерес представляют окислы тугоплавких металлов, которые по сравнению с другими окислами обладают наиболее высокими значениями диэлектрической постоянной. Наиболее отработана технология пленок из пятиокиси тантала.

Для защиты тонкопленочной части МСБ чаще других используется фоторезист ФН-11 с толщиной пленки 1,2—1,8 мкм.

В пастах, применяемых для получения диэлектрических пленок в конденсаторах толстопленочных ГИС, в качестве наполнителей используются диэлектрики с высокой диэлектрической постоянной, например двуокись титана  $TiO_2$  или титанат бария  $BaTiO_3$ . Удельная емкость конденсаторов на основе этих пленок  $4 \cdot 10^4$  пФ/см<sup>2</sup>.

Пленки для изоляционной прослойки в местах пересечения проводников создаются на основе фритты без наполнителя, которая имеет малую диэлектрическую постоянную и, следовательно, обеспечивает малую паразитную емкость ( $< 0,01$  пФ/см<sup>2</sup>).

**Проводники и контактные площадки.** Тонкопленочные проводники в ГИС служат для соединения пассивных тонкопленочных элементов и создания контактных площадок для присоединения активных навесных элементов и внешних выводов. Тонкопленочные проводящие материалы должны обладать высокой электропроводностью, хорошей адгезией к подложке, способностью к сварке или пайке, химической инертностью. Материалами с высокой электропроводностью являются золото, серебро, алюминий, медь. Однако пленки этих металлов не удовлетворяют всей перечисленной совокупности свойств и поэтому для получения тонкопленочных проводников используются многослойные композиции. Эти композиции включают подслой (толщиной  $(1 \div 3) \cdot 10^{-2}$  мкм) из материала, обеспечивающего хорошую адгезию (обычно хром, никром или ванадий), слой из материала с высокой электропроводностью (чаще всего медь вакуумной плавки толщиной 0,4—0,8 мкм) и покрытие (толщиной  $(5 \div 8) \cdot 10^{-2}$  мкм) из химически инертного материала с хорошей способностью к сварке или пайке (как правило, никель или золото). Ориентировочное значение удельного поверхностного сопротивления квадрата проводящей пленки  $\rho_0 = 0,02 \div 0,05$  Ом/□ и зависит от толщины пленки и применяемых материалов.

Проводящие пасты для толстопленочных ГИС должны обладать низким удельным сопротивлением слоя ( $< 0,1$  Ом/□) и обеспечивать возможность присоединения активных элементов методами пайки или сварки. Наполнителями для проводящих паст являются благородные металлы. Наименьшее удельное сопротивление слоя имеют пасты с золотом и платиной (0,002—

0,005 Ом/□). Пасты с другими благородными металлами и их смесями имеют удельное сопротивление слоя от 0,02 до 0,10 Ом/□ в зависимости от толщины пленки и содержания наполнителя.

**Пленочный монтаж.** В МСБ с помощью пленочных коммутационных проводников осуществляется электрическое соединение пленочных элементов и навесных компонентов в соответствии с принципиальной электрической схемой. Активными элементами МСБ наряду с ИМС все чаще становятся бескорпусные БИС. Объединение их

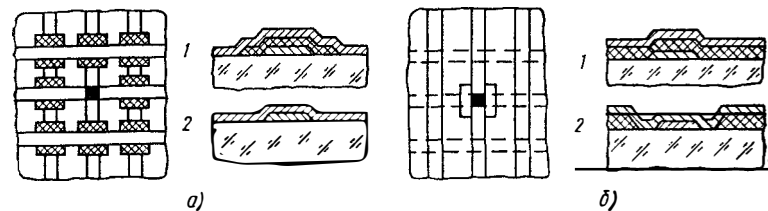


Рис. 6.4. Варианты построения коммутационных плат:

*a* — многослойным пленочным монтажом с изоляцией в областях пересечений проводников; *b* — со сплошным слоем изоляции и окнами в областях контакта проводников различных слоев; 1 — область изолированного пересечения проводников; 2 — область контакта проводников

в функционально сложную схему возможно на основе использования коммутационных плат с многоуровневой разводкой. Сейчас разработано и используется несколько технологических методов изготовления коммутационных плат: платы с многослойным тонкопленочным, толстопленочным или комбинированным монтажом; многослойные керамические подложки; платы с пленкой — носителем пленочных коммутационных проводников. Два варианта построения коммутационных плат с многослойным пленочным монтажом показаны на рис. 6.4. Для уменьшения паразитной емкости в областях пересечения проводников применяют материал с малой диэлектрической проницаемостью и увеличивают толщину изолирующего слоя. Однако с ростом толщины изолирующего слоя увеличивается высота ступенек и затрудняется получение однородного металлического покрытия в областях ступенек. Такая плата имеет два уровня разводки.

Многослойные толстопленочные структуры получают последовательным нанесением и вжиганием проводящих и изолирующих слоев. Материалы этих слоев должны

быть согласованы с ТКЛР подложки. Изолирующие слои необходимо изготавливать беспористыми для устранения коротких замыканий металлизации, а для повышения выхода годных плат и увеличения количества слоев применять двукратное нанесение и вжигание материала изолирующего слоя. При этом уменьшаются паразитные емкости за счет увеличения толщины диэлектрика. Количество уровней разводки достигает шести.

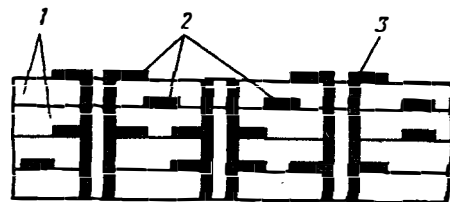
В коммутационных платах на основе многослойных керамических подложек число уровней разводки повышается до восьми. Последовательность технологических операций при изготовлении многослойной керамики состоит из изготовления керамических листов с отверстиями для межуровневых переходов, получении на этих листах металлической разводки методами толстопленочной технологии, металлизации отверстий, составлении из керамических листов пакета в соответствии с технологией разводки каждого уровня и спекания пакета (рис. 6.5). Особенностью керамических листов, применяемых для изготовления плат, является их высокая эластичность. Керамические листы представляют смесь собственно керамического порошка и связующего полимера, полимеризирующегося под действием давления и температуры. Все операции до спекания (механическая обработка, металлизация, сборка в пакет) проводятся на сырых керамических листах. Спекание осуществляется в контролируемой газовой среде, на последней стадии — в вакууме. При выборе металлов для разводки необходимо учитывать, что их температура плавления должна быть выше температуры спекания керамики. Благодаря большой толщине межуровневого изоляционного слоя (до 100 мкм и более) эти коммутационные платы имеют более низкие паразитные емкости по сравнению с толстопленочными и особенно тонкопленочными платами. Минимально возможная ширина проводников в них составляет 150 мкм, т. е. сравнима с шириной проводников в тонкопленочных ГИС, и несколько меньше, чем в толстопленочных (здесь 200—250 мкм).

В коммутационных платах с пленкой-носителем используют тонкую (50—60 мкм) полиимидную пленку-носитель коммутационных проводников. Двустороннюю металлизацию поверхностей пленки и боковых поверхностей вытравленных в ней отверстий для соединения проводников слоев осуществляют термовакуумным напылением толщиной 1—2 мкм с последующим гальваниче-

ским наращиванием толщиной 20—30 мкм по контуру, определяемому слоем фоторезиста, и лужением перехода. На неметаллизированных поверхностях подслои удаляют вместе с фоторезистом. Затем через прокладки с металлизированными переходами совмещают все точки и спекают столбики луженых капиллярных отверстий ( $\varnothing 40$  мкм) с помощью прижима, вакуума и высокой температуры (допустимая температура термообработки для полиимидной пленки — до 400 °С). Число уровней

Рис. 6.5. Структура коммутационной платы на основе многослойной керамики с металлизированными переходными отверстиями:

1 — керамический лист; 2 — металлическая разводка; 3 — металлизированное переходное отверстие



разводки у таких плат доведено до десяти. Перспективно применение пленки-носителя в МСБ с анодированной алюминиевой подложкой. Конструкция характеризуется высокой надежностью, технологичностью, механической прочностью и эффективным отводом теплоты от навесных компонентов. Большие размеры коммутационных плат с алюминиевой подложкой (100×200 мм) позволяют существенно сократить количество проводочных связей и тем самым повысить плотность компоновки и надежность РЭА.

**Разработка схемы соединений.** Сущность разработки топологии состоит в определении взаимного расположения пленочных элементов, выборе их формы, расчете геометрических размеров, компоновке навесных компонентов и пленочных элементов и размещении их на подложке в увеличенном масштабе. Разработка топологии проводится в три этапа: разработка схемы соединений на подложке; расчет геометрических размеров пленочных элементов; разработка эскиза топологии. Основной задачей разработки схемы соединений является выбор такого расположения активных компонентов и пленочных элементов, при котором обеспечивается минимум длины соединительных проводников и числа пересечений между ними. Исходными данными являются принципиальная электрическая схема с перечнем элементов, общие конструктивные требования и конструктивные данные на-



весных компонентов. Рекомендуется следующий порядок разработки схемы соединений: на принципиальной электрической схеме выделяют пленочные элементы и навесные компоненты; намечают порядок расположения компонентов и элементов; вычерчивают на миллиметровке условные изображения пленочных элементов, навесных компонентов и соединительных проводников.

После составления схемы соединений необходимо еще раз рассмотреть возможности уменьшения длины проводников и числа их пересечений за счет перестановок навесных компонентов и пленочных элементов, изменения их ориентации, а также перестановок идентичных выводов у навесных компонентов.

**Расчет геометрических размеров пленочных элементов.** Исходными данными для расчета геометрических размеров пассивных элементов МСБ являются перечень элементов принципиальной электрической схемы и технологические требования и ограничения, которые задаются технологическими методами их изготовления. Основные конструкторские требования и технологические ограничения, необходимые при разработке тонко- и толстопленочных МСБ и расчете геометрических размеров пассивных элементов, представлены в табл. 6.3 в виде минимальных геометрических параметров (все размеры в мкм).

**Резисторы.** Пленочные резисторы выполняются на подложках в виде полосок прямоугольной или специальной формы из металла, специальных сплавов (напыленных) или резистивных паст (вожженных). Концы полосок перекрываются контактными площадками, выполненными из металлов или паст с высокой электрической проводимостью. Основной характеристикой резистора является его электрическое сопротивление (Ом):  $R = \rho l / S$ , где  $\rho$  — удельное объемное сопротивление материала, Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $l$  — длина резистора, м;  $S$  — площадь поперечного сечения, мм<sup>2</sup>. Выражая  $R$  через параметры резистивной пленки, получаем  $R = \rho_n l / (bh)$ , где  $\rho_n$  — удельное сопротивление пленки, Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $b$  и  $h$  — ширина и толщина пленочного резистора, мм. Толщину резистивной пленки выбирают с учетом требуемого значения  $\rho_n$ , температурной стабильности, условий эксплуатации и технологических методов изготовления. Для каждого резистивного материала можно указать такие пределы изменения толщины, которым соответствуют малые изменения удельного поверхностного сопротивления, и отно-

Параметры	Ф*	М	Т
Погрешность линейных размеров элементов и расстояний между ними при их расположении в одном слое	10	10	100
Расстояние между элементами, расположенными в одном слое	100	300	300
Перекрытие элементов, расположенных в разных слоях	100	200	200
Расстояние между элементами, расположенными в разных слоях	100	200	400
Расстояние от элемента до края подложки	200	500	100
Ширина резистора	100	100	600
Длина резистора	100	300	600
Ширина пленочных проводников	50	100	200
Размеры контактных площадок	100×150	100×150	400×400
Расстояние от края компонента до края:			
подложки	400	400	1000
другого компонента	600	600	1000
элемента	400	400	1000
контактной площадки	400	400	900
Длина гибкого вывода навесного активного компонента без дополнительного крепления	3000	3000	3000

\* Ф и М — фотолитографическая и масочная технологии изготовления тонкопленочных ГИС; Т — толстопленочная технология.

шение  $\rho_n/d = \rho_0$ , Ом/□ (удельное сопротивление пленки, отнесенное к квадрату ее поверхности), используемое при расчете геометрических размеров пленочных резисторов, остается достаточно постоянным.

Исходным выражением для расчета сопротивления резисторов является произведение удельного сопротивления пленки на коэффициент формы:

$$R = \rho_0 K_\Phi \quad (6.1)$$

где  $K_\Phi = l/b = R/\rho_0$  показывает, из какого числа квадратов со стороной, равной ширине полоски  $b$ , состоит данный резистор, и определяет конфигурацию резистора.

Наиболее часто применяются резисторы в виде прямоугольной полоски, меандра с контактными площадками (составной резистор), регулярного меандра (рис. 6.6). При  $1 \leq K \leq 10$  изготавливают резисторы в виде прямоугольной полоски (рис. 6.6, а); при  $10 \leq K \leq 50$  — в виде

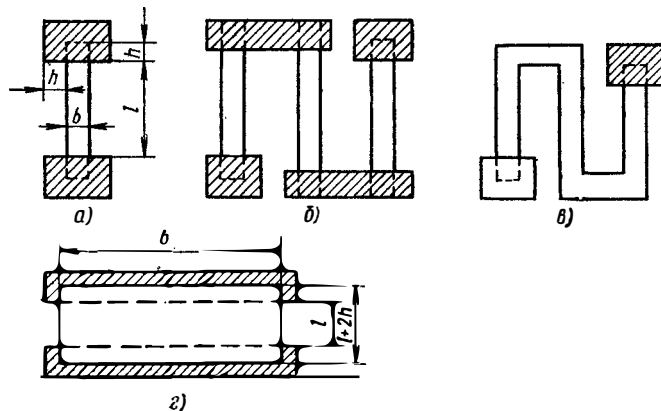


Рис. 6.6. Резисторы

меандра с контактными площадками или регулярного меандра (рис. 6.6, б, в); при  $K < 1$  ширина резистора становится больше его длины (рис. 6.6, г), в результате чего возрастает площадь контактных переходов и ширина коммутационных проводников; при  $K > 50$  площадь, занимаемая резистором, оказывается настолько большой, что рекомендуется использовать навесные дискретные резисторы.

Для расчета геометрических размеров резистора необходимы следующие данные: заданное номинальное значение сопротивления резистора —  $R$ , Ом; мощность, рассеиваемая резистором, —  $P$ , Вт; удельное сопротивление резистивной пленки —  $\rho_0$ , Ом/□ (из табл. 6.2); допуск на номинал резистора —  $\gamma_R$ , %; допуск на удельное сопротивление резистивной пленки —  $\gamma_\rho$ , % (из табл. 6.1); минимальный размер ширины (длины) резистора, определяемый возможностями технологического процесса изготовления  $b_{\min}$  ( $l_{\min}$ ), мм (из табл. 6.3); точность формирования геометрических размеров резисто-

ров (ширины и длины)  $\delta_b$  и  $\delta_l$ , мм (из табл. 6.3); максимально допустимая удельная мощность рассеяния резистивной пленки  $P_0$ , Вт/см<sup>2</sup> (из табл. 6.2).

Возможность изготовления резистора без подстройки определяют из условия

$$\gamma_\Phi > 0, \quad (6.2)$$

где  $\gamma_\Phi = \gamma_R - \gamma_\rho$  — максимально допустимая погрешность.

Расчет резистора прямоугольной формы при  $1 \leq K \leq 10$ . Резисторы с  $K_\Phi > 1$  критичны к ширине. Ширина резистора задается из неравенства

$$b_{\text{расч}} \geq \{b_{\text{мин}}; b_{\text{точ}}; 1,2b_P\}, \quad (6.3)$$

где  $b_{\text{точ}}$  — минимально допустимая ширина резистора, определяемая точностью формирования геометрических размеров, мм,

$$b_{\text{точ}} = \frac{\delta_l / K_\Phi + \delta_b}{\gamma_\Phi}, \quad (6.4)$$

$b_P$  — минимально допустимая ширина резистора, определяемая рассеиваемой резистором мощностью, мм,

$$b_P = \sqrt{\frac{P}{K_\Phi P_0}}. \quad (6.5)$$

За ширину резистора  $b$  принимают большее  $b_{\text{расч}}$  целое значение, кратное шагу координатной сетки, принятое для чертежа топологии. Расчетное значение длины резистора

$$l_{\text{расч}} = K_\Phi b. \quad (6.6)$$

За длину резистора  $l$  принимают ближайшее к  $l_{\text{расч}}$  целое значение, кратное шагу координатной сетки. При округлении  $l_{\text{расч}}$  необходимо оценивать получающуюся погрешность и при необходимости выбирать большее значение ширины резистора, при котором округление длины  $l_{\text{расч}}$  дает приемлемую погрешность. Погрешность, связанная с выбором геометрических размеров резистора,

$$\gamma_{\text{выб}} = \frac{l - l_{\text{расч}}}{K_\Phi b} 100\% \quad (6.7)$$

не должна превышать 1%. При конструировании резистора в виде отдельных резистивных полосок, соединенных проводящими перемычками (рис. 6.6, б), сумма длин резистивных полосок, заключенных между проводящими перемычками, должна равняться длине  $l$ , рассчитанной по формуле (6.6). При конструировании резисторов, имеющих форму меандра (рис. 6.6, в), сопротивление участка изгиба можно рассчитать по формулам:

а) для изгиба закругленной формы

$$R' = \frac{1,57}{\ln r_1/r_2} \rho; \quad (6.8)$$

б) для изгиба прямоугольной формы (уголок с длиной  $b$ )

$$R' = 2,55 \rho. \quad (6.9)$$

**Расчет резистора прямоугольной формы при  $K < 1$ .**

Расчет проводят по той же методике, что и для резистора с  $K > 1$ , с той лишь разницей, что по формуле (6.3) ищут длину резистора, так как резисторы при  $K > 1$  критичны к длине:  $l_{расч} \geq \{l_{мин}; l_{точ}; 1,2 l_P\}$ ,

где  $l_{точ} = \frac{\delta_l + \delta_b K_\Phi}{\gamma_\Phi}$ ;  $l_P = \sqrt{\frac{K_\Phi P}{\rho_0}}$ , а затем его ширину  $b_{расч} = l/K_\Phi$  и погрешность выбора  $\gamma_{выб} = \frac{(b - b_{расч})}{l} 100 \%$ .

При необходимости включения в состав МСБ пленочных конденсаторов и катушек индуктивностей их чаще всего выделяют из состава топологии основной платы и проектируют в виде навесных мозаичных элементов. Расчет параметров конструкции пленочных катушек индуктивности и пленочных конденсаторов, как правило, производится по номограммам и графикам.

**Разработка эскиза топологии.** После определения размеров пленочных элементов вычисляют площадь подложки и с учетом технологических ограничений выбирают типоразмер подложки из ряда стандартных размеров. Исходные данные для размещения элементов: схема соединения элементов на подложке, размер подложки, геометрические размеры пленочных элементов, электрические данные и требования, основные технологические данные и ограничения. Пленочные элементы изображают на миллиметровой бумаге в масштабе 10:1 или 20:1. При размещении элементов и компонентов на площади подложки используют последовательный метод, заключающийся в следующем. Схему соединения условно

разбивают на несколько групп (обычно по числу активных навесных компонентов). Сначала рисуют все элементы и компоненты, принадлежащие одной группе, затем — элементы и компоненты, принадлежащие другой, рядом расположенной группе и т. д. Этот метод позволяет более рационально и качественно разработать эскиз топологии. После размещения всех элементов и компонентов необходимо проанализировать разработанную топологию, чтобы придать изображенным на топологическом чертеже элементам и компонентам более простые формы и получить равномерное размещение их на площади подложки.

**Методы защиты МСБ от внешних воздействий.** Для предохранения МСБ от внешних воздействий применяют специальную защиту: бескорпусную и корпусированную. Бескорпусную применяют при кратковременном пребывании МСБ в условиях производственной атмосферы. Для этого на критичные пленочные элементы термическим испарением в вакууме наносят диэлектрическую пленку. При транспортировке бескорпусных МСБ используют технологическую тару. Корпусирование МСБ применяют при длительной эксплуатации их в условиях повышенной влажности и механических нагрузок. Герметизация корпуса в зависимости от используемых материалов его крышки и основания может быть выполнена контактной, электронно-лучевой, аргоно-дуговой или лазерной сваркой, пайкой мягкими или твердыми припоями, склеиванием поверхностей.

### § 6.3. Компоновка РЭА четвертого поколения

Для РЭА четвертого поколения характерна наибольшая плотность упаковки элементов в объеме  $\gamma$  (элементов на кубический сантиметр), которая на уровне блока определяется следующей зависимостью:

$$\gamma_{бл} = \gamma_{имс} / q_V, \quad (6.10)$$

где  $\gamma_{бл}$  и  $\gamma_{имс}$  — плотность упаковки элементов в объеме блока и средняя плотность установки элементов в объеме ИМС, применяемых в блоке, эл/см<sup>3</sup>;  $q_V$  — коэффициент дезинтеграции объема блока. Из (6.10) видно, что наивысшей плотности упаковки можно достигнуть в результате дальнейшего совершенствования как элементной базы (БИС, СБИС), так и методов компоновки (на-

пример, уменьшение коэффициента дезинтеграции за счет применения бескорпусных МСБ).

Однако повышение плотности упаковки приводит к увеличению удельной мощности рассеивания, что ухудшает тепловые режимы, а следовательно, резко изменяет параметры и режим работы комплектующих изделий относительно расчетных значений и тем самым может приводить к уменьшению надежности. Поэтому для уменьшения теплонпряженностей в блоках РЭА четвертого поколения необходимы дополнительные конструктивные меры по улучшению теплопередачи. Как известно, тепло передается от элемента в среду путем конвекции, лучеиспускания и теплопроводности. От внешней поверхности блока тепло передается в основном за счет конвекции и лучеиспускания, а внутри блока — в основном за счет теплопроводности, так как спецификой РЭА четвертого поколения являются малые газовые зазоры между нагретой зоной и корпусом, которые не обеспечивают условий для конвекции (рис. 6.7).

Для значительного увеличения теплопроводности внутри блока в функциональные ячейки вводятся теплоотводящие шины, которые могут быть выполнены в виде значительных участков фольги на печатных платах, тонких металлических пластин, на которые устанавливаются бескорпусные МСБ, металлических рамок с планками и т. п. Применение металлических рамок повышает теплопередачу не только в ячейке, но и в пакете ячеек, а от него к корпусу блока. Кроме того, наличие в конструкциях блоков РЭА четвертого поколения металлических рамок значительно увеличивает собственную частоту конструкции ячейки, тем самым повышая ее вибро- и ударопрочность.

Отличительной чертой конструкций РЭА четвертого поколения является также требование повышенной герметичности для защиты бескорпусных МСБ от действия внешней среды. Степень герметичности определяется на теканием газа  $V_n$  (или скоростью истечения газа из объема) ( $\text{дм}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ ):

$$V_n = \frac{V \Delta P}{t}, \quad (6.11)$$

где  $V$  — объем газа внутри блока,  $\text{дм}^3$ ;  $\Delta P$  — избыточное давление внутри блока, Па;  $t$  — срок службы или хранения блока, с. Для блоков с объемом свободного газа от 0,15 до 0,5  $\text{дм}^3$  степень герметичности, равная

$6,65 \cdot 10^{-6} \text{ дм}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ , обеспечивает внутри блока выдержку давления, близкого к нормальному, в течение 12 лет.

**Компоновочные схемы ФЯ четвертого поколения.** Функциональные ячейки на металлическом основании могут иметь несколько конструктивных вариантов в зависимости от формы самого основания и способа компоновки бескорпусных МСБ в ячейке, но в общем случае их можно подразделить на три вида: односторонняя, двусторонняя и сдвоенная компоновка.

Ячейка, показанная на рис. 6.8, выполнена на фрезерованной металлической (алюминиевой или магниевой) рамке по односторонней компоновочной схеме. Металлическая рамка имеет по контуру и оси симметрии ребра жесткости, а во внутренней плоскости — планки

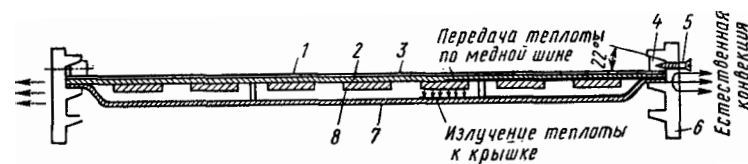


Рис. 6.7. Конструкция теплоотвода на корпусе блока:  
1 — печатная плата; 2 — медная шина; 3 — прокладка из стеклоткани;  
4 — алюминиевые клинья; 5 — прижимный винт; 6 — корпус блока; 7 —  
алюминиевая крышка; 8 — микросборка

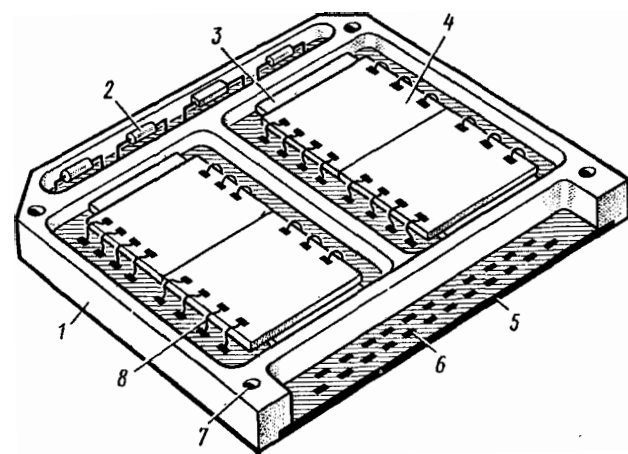


Рис. 6.8. Односторонняя компоновка ФЯ:  
1 — рамка; 2 — навесной ЭРЭ; 3 — планка; 4 — бескорпусная  
МСБ; 5 — печатная плата; 6 — выводная контактная площадка;  
7 — отверстие для стягивания ячеек в пакет; 8 — соединительный  
проводник

(толщиной 0,5—0,7 мм), на которые с помощью компаунда укреплены бескорпусные МСБ. С обратной стороны по контуру ребер жесткости к планкам приклеена печатная плата, в нижней части которой находится зона межъячеечной коммутации (с помощью либо гибких шлейфов, либо проволоочно-жгутового монтажа на гибкой матрице-ремне). Коммутация между бескорпусными МСБ осуществляется золотыми проволочками диаметром 30—50 мкм, длиной не более 3—5 мм, приваренными

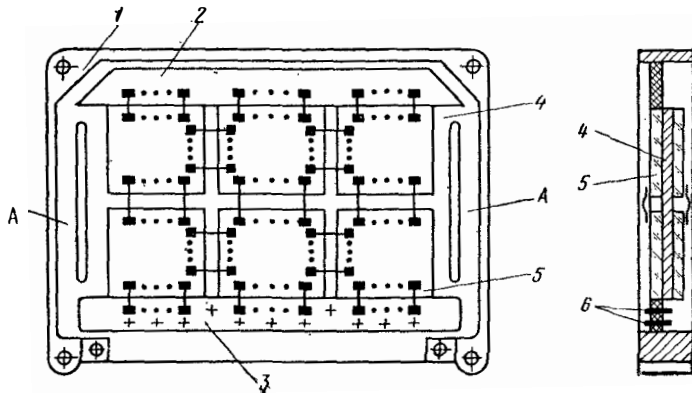


Рис. 6.9. Двусторонняя компоновка ФЯ:

1 — рамка; 2, 3 — верхняя и нижняя печатные вставки; 4 — планка рамки; 5 — бескорпусная МСБ; 6 — штыри

или припаянными одним концом к выводным контактным площадкам МСБ, а другим — к контактным площадкам печатной платы, находящимся в «окнах» между планками рамки. Для стягивания винтами ФЯ в пакет по углам рамки, а часто и на оси симметрии имеются отверстия под винты.

На рис. 6.9 представлена аналогичная ФЯ, выполненная по двусторонней компоновочной схеме. В данном случае в ее конструкции имеется лишь одна широкая планка, расположенная горизонтально, а бескорпусные МСБ приклеиваются к ней с двух сторон и соединяются по принципу «непрерывной микросхемы». Коммутация между МСБ осуществляется золотыми перемычками непосредственно между контактными площадками соседних МСБ, а в тех случаях, когда это неосуществимо (например, между МСБ верхнего и нижнего рядов), то соединения осуществляют выводом контактов на верхнюю и нижнюю печатные вставки, а последние соединяют жгу-

тиками из тонкого провода, например ГФ100М, уложенными в канавки между ребрами жесткости рамки и доплнительными буртиками (зоны А).

Сдвоенная функциональная ячейка (рис. 6.10) выполнена из двух односторонних рамок, между которыми проложена МПП, приклеенная к ним.

ФЯ на крупноформатных, как правило, толстопленочных подложках с применением бескорпусных МСБ можно считать как сверхбольшие гибридные интегральные схемы (рис. 6.11). На несущее основание из металла (стали, алюминия) вжигается толстопленочная подложка или приклеивается полиимидная пленка размером до сотен миллиметров, на которой создаются пленочные резисторы, конденсаторы, коммутация, устанавливаются навесные дискретные ЭРЭ и микрокомпоненты, совместимые с ИМС, разъем, а также тонкопленочные бескорпусные МСБ. Отдельные области на подложке и бескорпусные МСБ могут герметически закрываться коваровыми или титановыми крышками-экранами, например, с помощью опайки по контуру.

Для получения наибольшего эффекта при отводе теплоты от элементов, установленных на теплоотводящие шины или основания, необходимо обеспечить малое тепловое сопротивление между рамой ячейки или корпусом блока с теплоотводящими шинами и основаниями. Выбор варианта обеспечения теплового контакта зависит от конструкции ячеек и блока. Некоторые примеры вариантов тепловых контактов показаны на рис. 6.7, 6.12 и 6.13. В местах контактирования применяются теплоотводящие пасты с коэффициентом теплопроводности не ниже 0,5 Вт/м·град, а при использовании винтовых соединений тепловое сопротивление контакта может быть уменьшено в результате повышения чистоты обработки поверхностей, увеличения усилия сжатия, применения напыленных или гальванических покрытий, мягкометаллических прокладок. Примеры типовых конструкций ячеек герметичных блоков разъемного и книжного вариантов приведены на рис. 6.14, 6.15.

**Компоновочные схемы блоков четвертого поколения.** Применение в конструкциях блоков РЭА четвертого поколения бескорпусных МСБ позволяет значительно увеличивать плотность упаковки элементов, а следовательно, получать гораздо меньшие объемы блоков при одинаковой функциональной сложности по сравнению с блоками, выполненными на корпусированных ИМС. Умень-

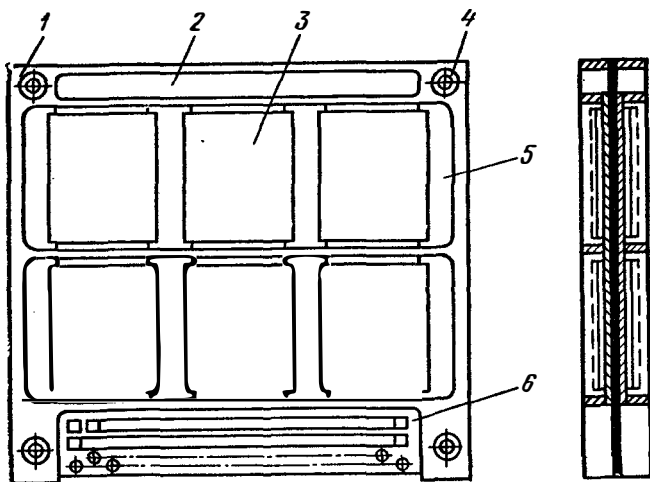


Рис. 6.10. Сдвоенная компоновка ФЯ:

1 — рамка; 2 — зона установки навесных ЭРЭ; 3 — бескорпусная МСБ; 4 — резьбовая втулка; 5 — печатная плата; 6 — зона выводных контактных площадок

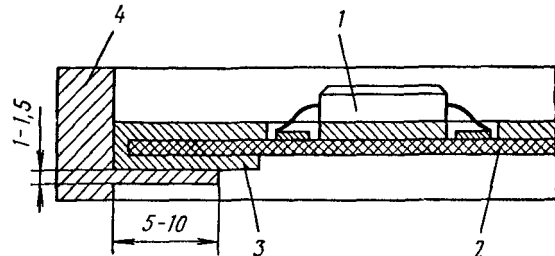


Рис. 6.12. Контактное соединение шины с буртиками рамы:

1 — микросборка; 2 — печатная плата; 3 — теплоотводящая шина; 4 — рама

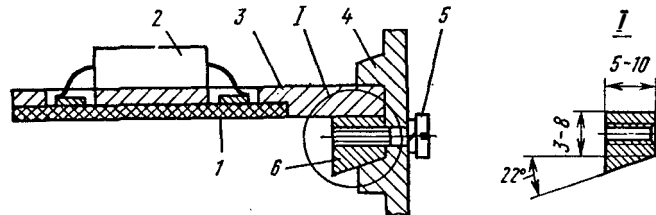


Рис. 6.13. Контактное соединение рамы ячейки с корпусом блока с помощью одностороннего клина:

1 — печатная плата; 2 — микросборка; 3 — рама; 4 — корпус блока; 5 — винт; 6 — клин

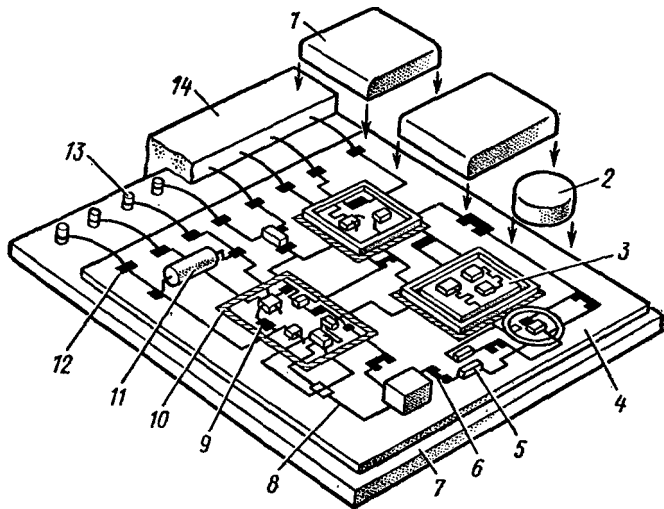


Рис. 6.11. Конструкция ФЯ на крупноформатной подложке:

1, 2 — коваровые крышки; 3 — тонкопленочная подложка; 4 — керамическая подложка; 5 — бескорпусный конденсатор; 6, 9 — толстопленочные резисторы; 7 — несущая подложка из металла; 8 — толстопленочный проводник; 10 — область, закрываемая термически; 11 — навесной ЭРЭ; 12 — толстопленочная контактная площадка; 13 — наконечник; 14 — разъем

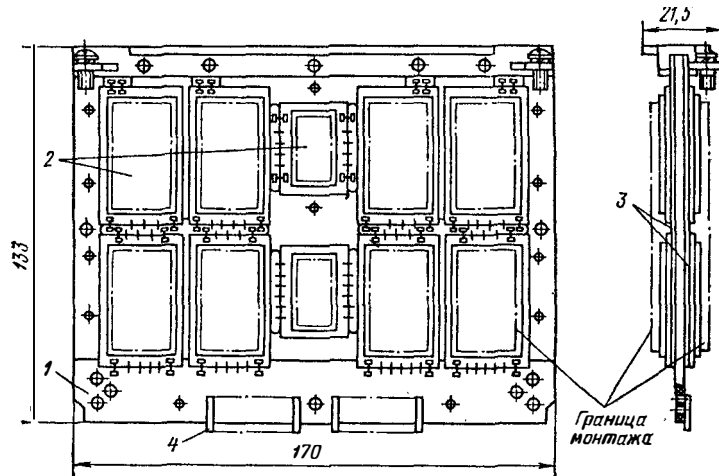


Рис. 6.14. Безрамочная ячейка герметичного блока РЭА разъемной конструкции:

1 — печатная плата; 2 — бескорпусные МСБ; 3 — металлические шины — основания; 4 — лепестковый контакт соединителя

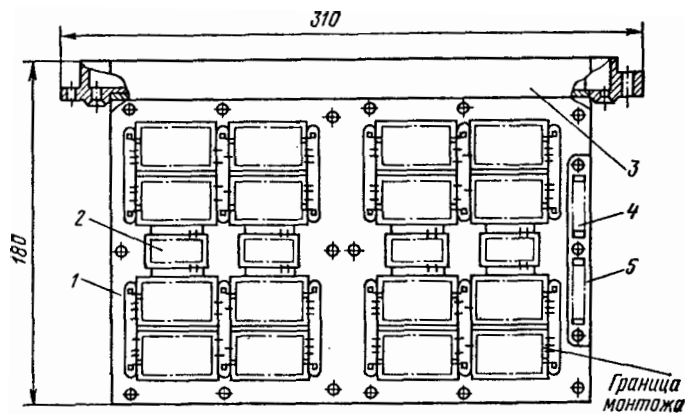


Рис. 6.15. Рамочная ячейка герметичного блока РЭА книжной конструкции с воздуховодом:

1 — металлическая пластина — основание; 2 — бескорпусные МСБ; 3 — воздуховод; 4 — печатная контактная площадка; 5 — печатная плата

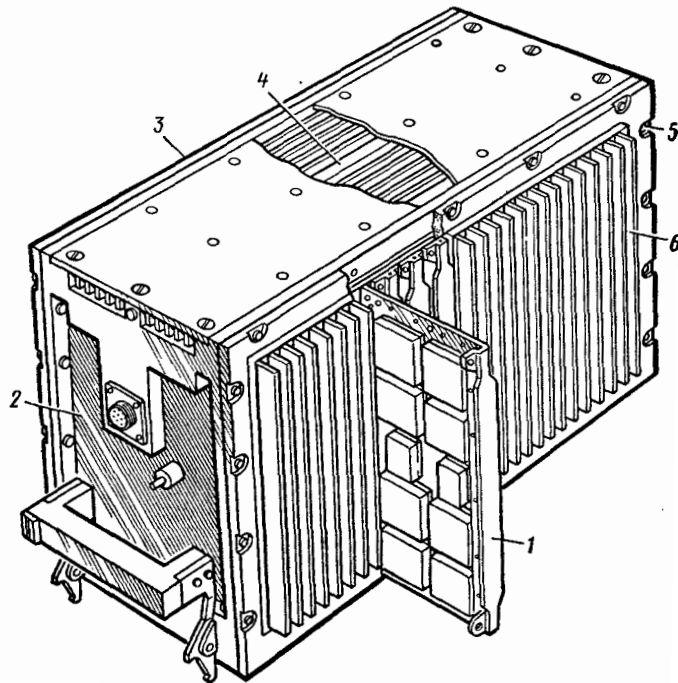


Рис. 6.16. Герметичный блок РЭА разъемной конструкции:

1 — ячейка; 2 — корпус; 3 — боковая крышка; 4 — средняя стенка; 5 — болт крепления; 6 — ребристый теплоотвод

шение объема блоков достигается также в результате применения более прогрессивных методов монтажа (с помощью гибких шлейфов и кабелей), компоновки (книжная вместо разъемной) и малогабаритных соединителей (РПС, СР-50 и типа «слезка»). Необходимость герметизации блоков и наличие внутри них избыточного давления заставляют применять в их конструкциях корпуса

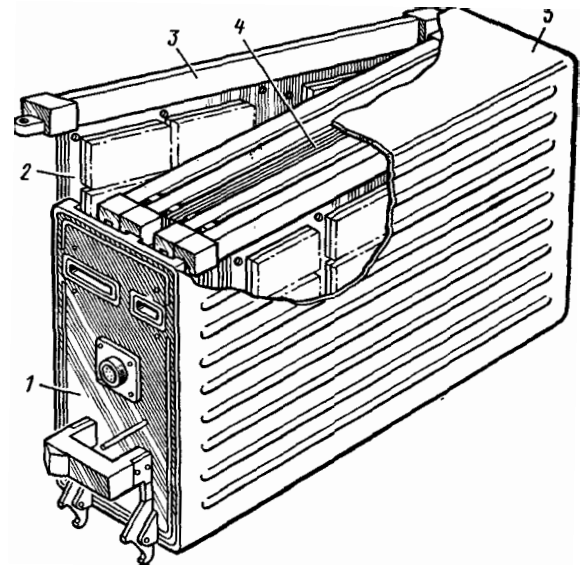


Рис. 6.17. Герметичный блок РЭА книжной конструкции с воздуховодом:

1 — передняя панель; 2 — ячейка; 3 — воздуховод; 4 — печатная объединительная плата с гибким печатным шлейфом; 5 — кожух

с довольно толстыми (3 мм) стенками, что существенно увеличивает коэффициент дезинтеграции массы даже при алюминиевых корпусах и является одним из недостатков такого рода конструкций. Корпуса блоков могут иметь стандартные размеры и формы, а для аппаратуры специального назначения чаще всего выбирают из условий минимальных масс, объемов, требуемых форм и степени планарности, обеспечивающих заданные тепловые режимы и вибропрочность при минимальных объемах (рис. 6.16, 6.17).

**Герметизация блоков.** Герметизации блоков, содержащих бескорпусные микросхемы и МСБ, осуществляется с целью предотвращения воздействия внешних климатических факторов на бескорпусные компоненты, входящие в состав микросхем и МСБ. Для создания наиболее благоприятного микроклимата внутри герметичного корпуса блока он через откачную трубку заполняется инертным газом или смесью газов с избыточным давлением не более  $12 \cdot 10^4$  Па. Как правило, для этого используют сухой азот, который по своим тепловым характеристикам приравнивается к воздуху.

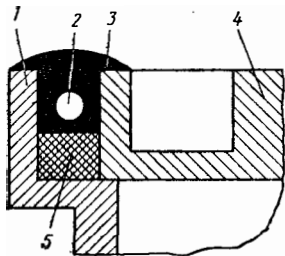


Рис. 6.18. Герметизация корпуса «паяным швом»:

1 — корпус; 2 — проволока; 3 — припой; 4 — крышка; 5 — резиновая прокладка

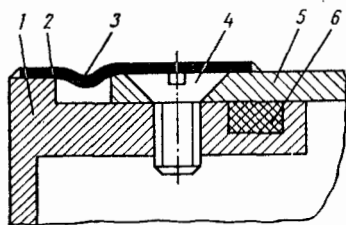


Рис. 6.19. Герметизация корпуса с помощью гофрированной ленты:

1 — лицевая панель; 2 — гофрированная лента; 3 — гофр ленты; 4 — винт; 5 — кожух блока; 6 — уплотнительная резиновая прокладка

Герметичность блоков обеспечивается герметизацией из корпусов и внешних электрических соединителей, которые устанавливаются на лицевой или задней панели корпуса. Герметизации корпусов блоков может осуществляться сваркой основания и крышки корпуса блока, с помощью паяного демонтируемого соединения корпуса (основания) с крышкой (кожухом) блока и с помощью уплотнительной прокладки. Выбор способа герметизации определяется требованиями, предъявляемыми к блокам в зависимости от условий эксплуатации, габаритными размерами (объемом) блока, а также материалами корпуса и основания блока.

Герметизация сваркой применяется для блоков, не подлежащих ремонту, объем которых не превышает  $0,5 \text{ дм}^3$ . Вскрытие таких блоков возможно только путем механического снятия сварного шва, что приводит к попаданию металлической пыли на бескорпусные компоненты и может вызвать их отказ. Этот способ широко используется для герметизации корпусов микросхем и МСБ и обеспечивает натекание не более  $1,33 \cdot 10^{-10} \text{ дм}^3 \cdot \text{Па/с}$ .

Герметизации с помощью паяного демонтируемого соединения осуществляется в основном в двух вариантах: с помощью проволоки или гофрированной ленты. Первый способ применяется для блоков, объем которых составляет  $0,5—5,0 \text{ дм}^3$ , второй способ — для блоков с объемом  $0,5—10,0 \text{ дм}^3$  и больше. Оба способа обеспечивают натекание  $V_{\text{н}} = 1,33 \cdot 10^{-7} \text{ дм}^3 \cdot \text{Па/с}$ , что гарантирует работоспособность блока в течение 12 лет. Конструктивные элементы герметизации корпусов блоков паяным соединением приведены на рис. 6.18—6.19.

В менее ответственных случаях герметизация осуществляется компаундами или уплотнительными прокладками и стягивающими винтами, позволяющими обеспечивать натекание  $V_{\text{н}} = 1,33 \cdot 10^{-4} \text{ дм}^3 \cdot \text{Па/с}$ .

Межблочная электрическая коммутация в герметичных блоках осуществляется с помощью герметичных соединителей типа РСГ или врубных соединителей типа РПС1 с обеспечением их герметичности (рис. 6.20). Монтажная плата, используемая для герметизации, должна иметь металлизированную поверхность по всему периметру с двух сторон и по торцу. При герметизации с использованием компаунда выводы электрических соединителей должны удлиняться путем припайки жесткой проволоки.

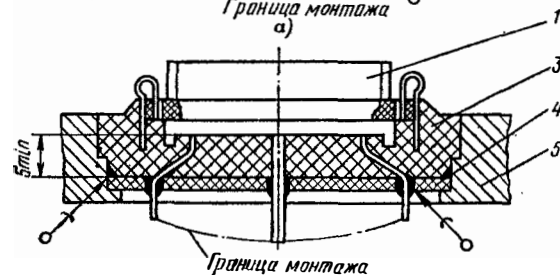
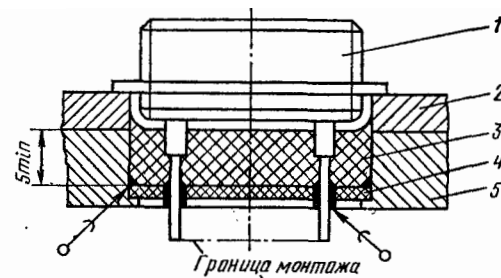


Рис. 6.20. Герметизация разъема опайкой платы и заливкой компаундом:

а — РСГ; б — РПС1; 1 — вилка разъема; 2 — прокладка; 3 — компаунд; 4 — монтажная плата; 5 — корпус блока

## ГЛАВА 7

### ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

#### § 7.1. ИМС большой и сверхбольшой степени интеграции

К большим интегральным микросхемам (БИС) условно можно отнести микросхемы четвертой степени интеграции (число элементов более 1000). Существуют две разновидности БИС: полупроводниковые и гибридные.

Полупроводниковые БИС содержат на одном кристалле сложные функциональные узлы: микропроцессор-



ры и запоминающие устройства. При создании БИС можно выделить три основных направления. Первое связано с совершенствованием существующих технологических процессов изготовления БИС и созданием новых. Это относится к повышению разрешающей способности литографии, использованию ионной имплантации и др. Однако имеются теоретические пределы для плотности элементов: для МДП-транзисторов  $10^7$ — $10^8$ , для биполярных транзисторов  $10^6$  на квадратном сантиметре. Использование многослойной металлизации также позволяет увеличить плотность элементов благодаря уменьшению длины межэлементных соединений и числа пересечений проводников. Второе направление использует увеличение размеров кристалла. Так, если в 1970—1973 гг. типовым размером кристалла был  $1,5 \times 1,5$  мм, то в 1973—1975 гг. он увеличился до  $6 \times 6$  мм, а в настоящее время — до  $10 \times 10$  мм и больше. Третье направление основано на разработке новых схмотехнических решений.

Выбор номенклатуры разрабатываемых БИС осуществляется двумя способами. Первый связан с созданием БИС, рассчитанных на широкое применение, но с некоторой избыточностью при выполнении конкретных задач. Это относится к микропроцессорным БИС, микросхемам памяти и некоторым другим; второй основан на использовании коммутированных (без металлизации) матриц логических ячеек, называемых универсальными и вентиляльными матрицами (УВМ). Конструктивно кристалл матричной БИС представляет собой совокупность регулярно расположенных логических ячеек (топологических фрагментов), между которыми предусматриваются свободные промежутки, необходимые для межсоединений. Матричная БИС выполняет заданные функции только на заключительном этапе изготовления, когда осуществлены необходимые межэлементные соединения.

В гибридных БИС (БГИС), так же как и в полупроводниковых ИМС, происходит увеличение степени интеграции. В БГИС на одной подложке могут быть объединены как различные элементы, так и компоненты, в том числе ИМС и БИС, выполненные по различным технологиям (биполярная, МДП-, тонко- и толстопленочная и др.). Это позволяет обеспечить широкий диапазон электрических параметров и решить сложные инженерные задачи по созданию микроэлектронной аппаратуры.

Технологию БГИС можно рассматривать как замену

существующих методов многослойного печатного монтажа при размещении на подложках бескорпусных полупроводниковых ИМС, БИС и т. д. Чаще всего БГИС содержит бескорпусные ИМС и БИС, объединенные металлической разводкой. Поэтому создание БГИС обычно сводится к коммутации ИМС и БИС в единый функциональный комплекс, называемый микросборкой.

Дальнейшее совершенствование конструкции и технологии изготовления микроэлектронной аппаратуры заключается в замене ее блоков на БГИС и переходе от печатных плат к платам, изготавливаемым по гибридной технологии.

Основные тенденции развития конструкций могут иметь следующие направления: дальнейшее развитие и внедрение в практику конструирования ИМС сверхвысокой степени интеграции и компонентов функциональной микроэлектроники; разработка новых принципов формообразования и компоновки РЭА; создание и промышленное освоение новых видов конструкционных материалов, их технологии изготовления для значительного уменьшения доли несущих конструкций в конструкциях РЭА; совершенствование существующих и развитие новых принципов коммутации в микроэлектронных конструкциях; увеличение эффективности систем теплоотвода и уменьшение масс и объемов систем охлаждения, разработка новых принципов и методов охлаждения радиоаппаратуры.

Первое направление развития конструкции РЭА решает эту задачу на уровне элементной базы, т. е. за счет значительного увеличения плотности упаковки. В остальных направлениях ставятся задачи создания наиболее компактной конструкции на основе новых способов формообразования, компоновки, монтажа, новых видов материалов, несущих конструкций и способов теплоотвода.

Новые способы формообразования и компоновки (второе направление) характеризуются общим стремлением перехода от РЭА третьего поколения к РЭА четвертого поколения, позволяющей получать более компактные конструкции. Это достигается за счет исключения корпусов ИМС из конструкций, а следовательно, уменьшения объема и массы не только за счет самих корпусов, но и за счет возможного при этом уменьшения конструктивных зазоров между ИМС. Такой принцип конструирования РЭА четвертого поколения можно считать первым этапом выполнения задачи по уменьшению коэффициен-

та дезинтеграции. Объясняется это тем, что в данном случае частично используются возможности полной микроминиатюризации конструкций, т. е. полезного объема и массы, или объема и массы схемных элементов (ИМС, БИС). Традиционные же способы конструирования несущих конструкций (плат, подложек) и монтажа остаются прежними, а в общем объеме и массе конструкции блока последние составляют значительную часть. Так, если для РЭА третьего поколения объем и масса активных (схемных) элементов (корпусированных ИМС) составляют 15—30%, а объем монтажа и несущих конструкций 70—85%, то для РЭА четвертого поколения доля полезного объема и массы (бескорпусных ИС) обычно не превышает единиц процентов. Такая диспропорция между элементной базой и остальными элементами конструкции обусловлена установившимися способами их разработки.

Устранена эта диспропорция при конструировании гибких печатных схем и крупноформатных пленочных подложек на металлическом основании (третье направление). Здесь вместо жесткого основания печатной платы, выполненного из гетинакса, стеклотекстолита и их заменителей, имеющих толщину порядка 1—1,5 мм, используются полиимидные пленки, толщина которых обычно составляет от 0,1 до 0,28 мм, а разрешающая способность печатных рисунков равна 0,08—0,13 мм. Гибкие пленки обладают способностью сгибаться, сворачиваться в рулон и скручиваться под углом, что позволяет создавать конструкции РЭА из них во всех трех измерениях в отличие от жестких печатных плат (двухмерное пространство). Применение гибких печатных схем повышает надежность, сокращает время сборки устройств и уменьшает объем и массу в 2—4 раза по сравнению с применением жестких плат. При этом доля их объема и массы значительно уменьшается.

Крупноформатные подложки выполняются чаще всего на стальном листе толщиной 500 мкм с нанесенной на него путем обжига керамической толстопленочной основы толщиной 100 мкм или на алюминиевом основании примерно той же или несколько большей толщины с наклеенной тонкопленочной полиимидной пленкой. Размеры таких подложек 300×450 мм. Это позволяет обеспечить в конструкциях ФЯ высокие теплоотвод, вибропрочность, компактность и низкую стоимость при отсутствии печатных плат, рамок и подложек. В обоих случаях на подложку или трассировочную пленку устанавливают

БИС и СБИС в специальных малогабаритных корпусах — кристаллодержателях (5-го типа) или на лентах-носителях.

Эти принципы конструирования можно считать вторым этапом выполнения задачи по повышению компактности компоновки, основанном на микроминиатюризации несущих конструкций.

Четвертым направлением перспективного развития конструкции РЭА может быть широкое внедрение оптических волноводных линий монтажа взамен гальванических соединений в блоках. При этом методами интегральной технологии можно изготавливать оптоэлектронные устройства, объединенные на платах-подложках, пакет которых образует блок.

Пятое направление основано на уменьшении объема и массы теплоотводящих элементов конструкции за счет увеличения их теплопроводности и новых систем охлаждения.

В заключение отметим, что полное решение вопросов КММ РЭА должно включать и вопросы уменьшения объема и массы кабельной сети (межблочной коммутации). В этом направлении перспективными являются методы мультиплексирования и волоконной оптики, которые находят все более широкое развитие.

## § 7.2. Основные направления развития функциональной микроэлектроники

Дальнейшее развитие и функциональное усложнение изделий РЭА было бы невозможно без постоянного совершенствования электроники. Современная электроника использует электронные явления в твердых телах (в основном в полупроводниках). Совершенствование элементной базы, выполненной на основе явлений электроники, шло по пути повышения степени интеграции и в первую очередь за счет увеличения количества транзисторов. Однако в транзисторной микроэлектронике не смогла окончательно решиться проблема комплексной микроминиатюризации, и ее дальнейшая микроминиатюризация имеет теоретический предел, который в первую очередь обусловлен ограничениями по надежности, конструктивной сложности, скорости передачи информации, объему запоминающих устройств.

Увеличение количества компонентов в ИМС естественно приводит к снижению их надежности и уменьше-

нию выхода годных схем. При достигнутом высоком уровне плотности монтажа возрастает опасность появления паразитных взаимосвязей, что приводит к усложнению конструкций. В связи с постоянным увеличением объема перерабатываемой информации для запоминающих устройств ЭВМ требуется объем памяти, равный емкости памяти человеческого мозга, что составляет около  $10^{13}$  бит, а требуемая скорость передачи информации составляет для ЭВМ  $10^{10}$ — $10^{12}$  бит/с и для линий связи  $10^8$ — $10^{10}$  бит/с, что при использовании только электронных явлений практически недостижимо. Следующим шагом в развитии микроэлектронной элементной базы стала функциональная микроэлектроника, в которой расширение функциональных возможностей аппаратуры обеспечивается за счет более полного использования физических явлений в твердом теле. Особенностью элементов функциональной микроэлектроники является использование сред с распределенными параметрами.

В устройствах функциональной микроэлектроники используются различные явления, требующие различного подхода к проектированию этих устройств, поэтому каждое направление стало сложной самостоятельной областью науки и техники.

Основными направлениями функциональной микроэлектроники являются: оптоэлектроника, акустоэлектроника, квантовая микроэлектроника (криоэлектроника), магнитная микроэлектроника, нейристорная микроэлектроника.

*Оптоэлектроника* основана на использовании света в качестве многомерного носителя информации и использовании оптических явлений для обработки этой информации. Приборы оптоэлектроники используют электронные и оптические явления в веществах.

Для устройств оптоэлектроники используется оптический диапазон частот, в котором так же, как в радиочастотном диапазоне, существует зависимость геометрических размеров устройств от длины волны. Если в радиочастотном диапазоне размеры компонентов составляют сантиметры и миллиметры, то в оптическом — микрометры, что ведет к миниатюризации функциональных компонентов оптоэлектроники.

Основу любой оптоэлектронной системы составляют оптоизлучатели, которые делятся на источники когерентного излучения (лазеры) и источники некогерентного излучения (в основном светоизлучающие диоды). Устрой-

ства когерентной оптоэлектроники отличаются друг от друга принципом генерации, распространения и регистрации сигналов, имеют различные требования к параметрам, решают различные задачи.

Когерентная оптоэлектроника имеет преимущества, определяющие перспективы ее развития. Прежде всего это высокая информационная емкость оптических каналов, обусловленная тем, что частоты оптических колебаний в  $10^3$ — $10^5$  раз выше, чем в освоенном диапазоне радиочастот. Малая длина волны оптических колебаний обеспечивает высокую плотность записи в оптических запоминающих устройствах (ЗУ), которая может составлять около  $10^8$  бит/см<sup>2</sup>. Для оптического сигнала можно осуществлять временную и пространственную модуляцию, что дает возможность работать с целыми изображениями или с изменением оптических сигналов в пространстве.

Элементную базу когерентной оптоэлектроники составляют лазеры различных типов, модуляторы и дефлекторы, управляющие излучением, волоконно-оптические световоды, голографические запоминающие устройства. Важным направлением когерентной оптоэлектроники является использование в системах связи волоконно-оптических линий связи, основой которых являются оптические кабели, изготавливаемые из отдельных световодов. Такие линии связи обладают высокой помехозащищенностью от внешних электромагнитных полей и паразитных взаимосвязей между каналами, малыми габаритами и массой, что особенно важно для бортовой аппаратуры. Широкий диапазон рабочих частот позволяет передавать по оптическим линиям связи без взаимных помех огромное количество информации. Например, по одной линии оптической связи можно одновременно передавать  $10^6$  телепрограмм.

В настоящее время такие элементы, как лазеры, оптические модуляторы, световоды освоены промышленностью, а, например, голографические ЗУ пока еще находятся в стадии разработки и лабораторных исследований.

Некогерентная оптоэлектроника существенно дополняет уже развитую микроэлектронику, расширяя функциональные возможности РЭА. В системах некогерентной оптоэлектроники обеспечивается почти идеальная изоляция элементов схем, тогда как элементы современной электроники, обеспечивающие изоляцию узлов и блоков

(трансформаторы и конденсаторы), имеют узкий диапазон частот, паразитные обратные связи выхода со входом, конструктивную и технологическую несовместимость с ИМС. Наличие высокой электрической изоляции, недоступной для электронных цепей, дает возможность управлять высокими напряжениями с помощью низких напряжений, легко связывать цепи с различными частотами, преобразовывать постоянный ток в переменный и т. д.

Для систем некогерентной оптоэлектроники характерно отсутствие паразитной обратной связи от фотоприемника к излучателю, что существенно упрощает систему и ее проектирование.

Элементную базу некогерентной оптоэлектроники составляют светоизлучающие диоды (СИД), фотоприемники и оптрона.

СИД — основной и наиболее универсальный излучатель некогерентной оптоэлектроники. Малые прямые падения напряжения обеспечивают электрическую совместимость СИД с ИМС. Кроме того, СИД имеют хорошую технологическую совместимость с микронными устройствами. Промышленность выпускает целый ряд различных СИД, предназначенных для широкого применения в РЭА.

Фотоприемник предназначен для преобразования энергии оптического излучения в электрическую энергию. В качестве фотоприемников могут использоваться фотодиоды, фототранзисторы, фоторезисторы. Наиболее удобным образом удовлетворяют требованиям к фотоприемникам фотодиоды. Все виды фотоприемников освоены отечественной промышленностью.

Оптрона — приборы, в которых имеются излучатели и фотоприемники, оптически и конструктивно связанные друг с другом. Связь оптрона с внешней схемой электрическая, так как входные и выходные системы оптрона электрические. Основные преимущества оптронов — высокая электрическая изоляция входа и выхода, отсутствие паразитной обратной связи с выхода на вход в широкой полосе частот, возможность бесконтактного (оптического) управления электронными объектами, высокая помехозащищенность и отсутствие взаимных наводок — способствовали широкому применению оптронов в РЭА. Промышленность выпускает оптрона различных типов, предназначенные для работы в импульсных и аналоговых устройствах различного назначения, специальные

бескорпусные оптрона, предназначенные для использования в гибридных ИМС и МСБ.

Оптоэлектроника в настоящее время — развитие направление функциональной микроэлектроники, и ее внедрение является качественно новым этапом в развитии РЭА.

Акустоэлектроника использует в качестве носителя информации поверхностные акустические волны (ПАВ), распространяющиеся в тонком порядке длины волны поверхностном слое твердого тела. Существенными преимуществами ПАВ являются их малая скорость распространения (примерно на пять порядков меньше скорости распространения электромагнитных волн) и возможность взаимодействия с планарными структурами на поверхности звукопровода, обеспечивающая управляемое изменение характеристик ПАВ-устройств. Эти преимущества дали возможность создать самые разнообразные устройства акустоэлектроники. ПАВ-устройства имеют планарную конструкцию, что делает их легко совместимыми с ИМС.

Элементную базу акустоэлектроники составляют акустоэлектронные радиокомпоненты (АРК) самого различного функционального назначения. Все существующие АРК делят на однофункциональные и многофункциональные. К однофункциональным АРК, выполняющим какую-либо одну функцию в процессе обработки сигнала, относятся линии задержки, фильтры, резонаторы, акустические трансформаторы сопротивлений, разветвители и сумматоры сигналов, фазовращатели, аттенуаторы. Используя такие АРК, можно создавать универсальные акустические блоки для сложных многоканальных систем пространственно-временной обработки сигналов. Наиболее освоенными в настоящее время являются линии задержки и фильтры. Промышленность выпускает линии задержки с однократной задержкой сигнала (линии задержки общего типа) и с многократной задержкой сигнала (многоотводные линии задержки). Выпускаются различные полосовые и специальные фильтры. Многофункциональные АРК компонуются из однофункциональных АРК, электрических и электронных элементов.

В дальнейшем частотный диапазон АРК можно расширить за счет использования высших гармоник, будет происходить освоение сверхзачастотных фильтров. Можно ожидать, что будут реализованы резонаторы на

ПАВ с температурной стабильностью частоты, соизмеримой с традиционными кварцевыми резонаторами при неоспоримых преимуществах резонаторов на ПАВ.

Развитие акустоэлектроники идет быстрыми темпами благодаря технологической общности процесса изготовления АРК и ИМС и возможности использования уже развитого парка технологического оборудования, а также благодаря большим возможностям ее элементной базы.

*Криоэлектроника* — направление функциональной микроэлектроники, основанное на использовании явления сверхпроводимости, которое проявляется при низких температурах. Элементную базу криоэлектроники составляют различные типы резонаторов высокой добротности, сверхпроводящие высокочастотные линии и электронные устройства, основанные на эффекте Джозефсона. Создание устройств на эффекте Джозефсона сравнительно молодое и наиболее перспективное направление криоэлектроники. В устройствах на эффекте Джозефсона используются особенности контактов слабосвязанных проводников. Это контакты двух сверхпроводящих пленок, разделенных очень тонким слоем диэлектрика. На эффекте Джозефсона были созданы уникальные устройства для ЭВМ, приемники ВЧ-сигналов, измерительные устройства, которые по своим параметрам превосходят все, что было достигнуто раньше. Для ЭВМ были разработаны ячейки памяти, логические схемы, регистры сдвига. На основе элементов криоэлектроники можно создать процессорную и запоминающую часть ЭВМ, которая по структуре будет эквивалентна наиболее мощным из существующих ЭВМ, а производительность такой ЭВМ может составлять  $10^{10}$  опер/с. Для приемника высокочастотных сигналов разработаны детекторы электромагнитного излучения, преобразователи, смесители, усилители и генераторы. В разработке этих устройств есть еще нерешенные проблемы, но по своим параметрам они уже достигли или превзошли уровень приборов аналогичного назначения, основанных на других физических явлениях.

Достигнутый уровень параметров не является предельным и можно будет создавать самые чувствительные и малоинерционные приемники миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Криоэлектроника имеет большое будущее, но в настоящее время большая часть устройств еще не получила промышленной реализации в

основном в связи с большими технологическими трудностями, возникающими при изготовлении структур с очень тонкими слоями — в несколько тысячных микрометра.

*Магнитная микроэлектроника* основана на реализации новых физических явлений в магнитных материалах, использующих электромагнитные процессы на атомном уровне. Сущность этого направления заключается в использовании единичного магнитного домена в качестве элементарного носителя информации. К устройствам этого направления относятся устройства на цилиндрических магнитных доменах (ЦМД). ЦМД обычно формируются в монокристаллических пластинах магнитного материала малой толщины. С использованием ЦМД разработаны ЗУ и логические устройства, регистры, счетчики импульсов и другие устройства.

В отличие от известных ЗУ на магнитных барабанах, дисках или лентах ЗУ на ЦМД имеют значительно меньшие габариты и массу, меньшее потребление энергии, более высокие надежность работы и быстродействие. Кроме того, ЗУ на ЦМД выполняются методами уже развитой интегральной технологии. Важным свойством их является сочетание высокого быстродействия с возможностью хранения больших объемов информации. На ЦМД можно решать широкий круг логических задач. На базе построения конкретных схем с ЦМД могут быть реализованы логические функции И, ИЛИ, НЕ и их комбинации. Основное преимущество — кристалл на ЦМД является законченной вычислительной средой, на поверхности которой можно размещать схемы, реализующие самые различные комбинации логических, переключающих функций и функций памяти.

*Нейристорная электроника* — одно из наиболее перспективных направлений функциональной микроэлектроники, основанное на использовании нейристоров, которые являются твердотельными аналогами нервного волокна. Нейристоры — многофункциональные высоконадежные элементы, выполняющие любые логические операции и осуществляющие хранение информации. В основу создания нейристора был положен его биологический аналог — нейрон. В биологических системах все устройства приема, обработки и хранения информации, обладающие очень высокой надежностью при высокой сложности строятся на основе единого универсального устройства — нейрона. Поэтому разработка нейристоров является важнейшим направлением в построении слож-

ных больших систем и создании искусственного интеллекта.

В настоящее время предложено большое число различных вариантов нейристоров: механических, магнито-электрических, термоэлектрических, квантовых, на основе сверхпроводящих материалов, на транзисторных схемах, на туннельных диодах, на полупроводниковых приборах с S-образной характеристикой. По мнению исследователей, наиболее перспективным является полураспределенный нейристор, представляющий собой реализованные в единой полупроводниковой пластине, связанные между собой объемной связью полупроводниковые элементы с обратной связью.

Большие преимущества нейристоров могут быть реализованы в сложных вычислительных устройствах, к которым электроника подходит только в настоящее время. Сложные нейристорные устройства сейчас в основном находятся на стадии разработки и лабораторных исследований. Дальнейшее развитие нейристорной электроники связано с проблемами, комплексное решение которых приведет к разработке таких схемотехнических методов, которые смогут превзойти все предложенные до сих пор методы создания искусственного интеллекта.

## ГЛАВА 8

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАШИННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ ИЗДЕЛИЙ РЭА

#### § 8.1. Общие вопросы автоматизации проектирования РЭА

Усложнение радиоэлектронной аппаратуры, выполненной на микроэлектронной элементной базе, потребовало от разработчиков РЭА использования новых методов проектирования. Это связано, во-первых, с тем, что требовалось сокращение сроков проектирования аппаратуры, что было вызвано не только зависимостью научно-технического прогресса от развития средств радиоэлектроники и вычислительной техники, но и бурным развитием микроэлектроники, которое стало сближать сроки морального старения элементной базы со сроками проектирования аппаратуры; во-вторых, необходимо было повысить производительность труда разработчика и конструктора, так как уровень сложности РЭА стал прибли-

жаться к границе, за которой эффективность труда человека-проектировщика начинает падать.

Современная сложная РЭА разрабатывается, как правило, на основе целого комплекса новых технических решений. Чтобы создавать такую аппаратуру, необходимо синтезировать и анализировать множество вариантов возможных решений, что невозможно осуществить человеку-разработчику. На конечных этапах разработки человека-конструктору приходится выполнить большой объем нетворческой работы, связанной с решением конкретных технических задач и выпуском конструкторской документации. При разработке РЭА возникла необходимость использования средств вычислительной техники, и начиная с 60-х годов стали широко применяться вычислительные машины высокой производительности. Если в начальной фазе своего использования ЭВМ применялись главным образом для сложных расчетов, то усложнение аппаратуры, широкая номенклатура используемых схем потребовали решения на ЭВМ новых задач схемотехнического и конструкторского проектирования, которые уже не могли выполняться старыми методами. Оказалось, что технические требования к РЭА уже не могут быть обеспечены без интенсивного использования ЭВМ в процессе проектирования и изготовления новых изделий. Таким образом, возникла новая инженерная наука — проектирование РЭА с помощью ЭВМ, которая получила название «Машинное проектирование».

В общем случае при проектировании сложного радиоэлектронного устройства можно выделить три основных этапа машинного проектирования: системное, функциональное, техническое.

На этапе *системного* проектирования в соответствии с техническим заданием разрабатывается структурная схема устройства. Затем схема разбивается на функционально законченные узлы, определяются основные характеристики этих узлов, разрабатываются технические задания на их проектирование. На этом же этапе выбирают систему используемых элементов и конструкций, определяют информационный обмен между блоками. Этап системного проектирования пока не является автоматизированным, так как на этом этапе слишком велика доля творческого труда инженера. Поэтому здесь максимально используются творческие возможности разработчика, а электронная вычислительная машина выбирает оптимальный вариант решения из тех решений, которые

принимает разработчик. Следовательно, этап системного проектирования пока является неформализованным процессом, когда отсутствует регламентированный технологический процесс проектирования с формализованными математическими процедурами.

На этапе *функционального* проектирования разрабатывается принципиальная схема аппаратуры с определением ее параметров и структуры. Производится выбор элементной базы для реализации РЭА, расчет и оптимизация режимов работы аппаратуры, разрабатываются схемы соединений. Этот этап может быть формализован и сведен к моделированию и анализу схем. На этапе функционального проектирования широко используются логические и вычислительные возможности ЭВМ.

Этап *технического* проектирования можно разделить на конструкторское и технологическое проектирование. Основной задачей конструкторского проектирования является определение оптимального пространственного расположения элементов всех структурных уровней конструкции, соединений их между собой и подготовка соответствующей конструкторской документации. После этого можно перейти к технологическому проектированию, цель которого состоит в автоматизированной выдаче технологических документов, необходимых для автоматизированного изготовления аппаратуры и ее контроля. Таким образом, с помощью машинного проектирования можно полностью реализовать этапы функционального и технического проектирования, т. е. полный цикл разработки РЭА пока не автоматизирован.

Развитие машинного проектирования пошло по пути автоматизации наиболее трудоемких этапов проектирования. Самым трудоемким оказался этап технического проектирования, поэтому оно оказалось наиболее развитым по сравнению с другими этапами машинного проектирования. Удельный вес задач технического проектирования в общем цикле разработки РЭА постоянно возрастает, так как резко падает возможность унификации узлов в связи с переходом на микроэлектронную элементную базу, когда в едином технологическом процессе изготавливают микросхемы с высокой степенью интеграции. Кроме того, усложняются коммутационные схемы в одном узле, а для изготовления их и фотошаблонов требуются большие массивы информации. Необходимость автоматизации важна еще и потому, что появляется возможность оперативного внесения изменений, так как ав-

томатизированная система позволяет анализировать и сопоставлять результаты проектирования для быстрого принятия необходимых решений. Создание автоматизированных систем технического (конструкторско-технологического) проектирования позволяет перейти к комплексной автоматизации конструирования и изготовления узлов и блоков РЭА.

В дальнейшем системы технического проектирования стали разрабатываться как самостоятельные, не предназначенные для выполнения этапов системного и функционального проектирования и получили название систем автоматизированного проектирования (САПР). Идеальная система автоматизированного проектирования полностью обрабатывает с помощью ЭВМ техническое задание, составленное конструктором. Система программ определяет порядок выполнения отдельных этапов проектирования, и на выходе ЭВМ появляется документация для системы автоматизированного управления технологическими процессами изготовления изделия.

Для решения задач технического проектирования необходимо иметь техническую базу (техническое обеспечение) и математическое (программное) обеспечение, которые определяются сложностью и характером решаемых задач.

## § 8.2. Техническое и программное обеспечение систем автоматизированного проектирования

Система автоматизированного проектирования представляет собой сложный комплекс средств автоматизации, в который входят: технические средства автоматизации проектирования; математический аппарат, представляющий собой совокупность математических методов и алгоритмов проектирования, необходимых для выполнения процесса автоматизированного проектирования и машинных программ, обеспечивающих работу технических средств; комплект нормативно-технической документации, устанавливающей правила эксплуатации САПР и подготовки исходных данных, форму представления результатов проектирования, порядок прохождения документации при автоматизированном проектировании и т. д.

Для осуществления автоматизированного проектирования необходимо иметь все сведения о проектируемом



устройстве и представить их в заданной форме. Таким образом, под комплексом средств автоматизации проектирования следует понимать совокупность различных видов его обеспечения. При этом весь комплекс средств автоматизации проектирования должен обеспечивать главную задачу создания автоматизированной системы — обязательный количественный или качественный выигрыш от автоматизации.

Важнейшими средствами обеспечения САПР является техническое и программное обеспечение. Техническое обеспечение — это совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих технических средств, предназначенных для выполнения процесса автоматизированного проектирования.

В каждой конкретной системе автоматизированного проектирования решаются различные задачи, требующие для своего решения различного технического оборудования. В общем случае можно выделить два основных класса задач. Задачи первого класса связаны с подготовкой, обработкой, хранением и контролем информации и выпуском документации и управляющей информации, а задачи второго класса — непосредственно с процессом проектирования: это задачи анализа конструктивных решений, проектирования компоновки, размещения для различных структурных уровней, проектирования топологии монтажных соединений на всех уровнях (задача трассировки), контроль правильности решения задач проектирования.

Для решения всех перечисленных задач прежде всего необходимо иметь универсальную ЭВМ, обладающую высокой надежностью, большим объемом оперативной памяти, большим быстродействием, хорошим математическим обеспечением. Всем перечисленным требованиям удовлетворяют, например, ЭВМ Единой серии (ЕСЭВМ). Однако с точки зрения организации вычислительного процесса и рационального использования современных вычислительных машин многие системы автоматизированного проектирования построены с использованием нескольких ЭВМ, которые связаны между собой линиями обмена. Функции между ЭВМ распределяются в соответствии с классами задач автоматизированного проектирования.

Для решения задач первого класса нужны машины средней производительности с хорошо организованным архивом большой емкости на магнитных барабанах, лен-

тах или дисках, с набором специализированных исполнительных устройств и устройств ввода—вывода. Задачи первого класса, особенно связанные с подготовкой, отображением, редактированием данных, занимают много времени и мало зависят от быстродействия ЭВМ. Поэтому загружать этими операциями ЭВМ высокой производительности иерационально.

Для решения задач второго класса нужны вычислительные машины высокой производительности с большой оперативной памятью и штатным набором устройств ввода и вывода. Таким образом, принципиально САПР может быть построена и на одной ЭВМ и с использованием комплекса ЭВМ, а задачи, которые возлагаются на каждую конкретную САПР, определяются производительностью вычислительного комплекса.

ЭВМ в САПР решает большой круг задач, обладая исключительными возможностями по сбору, накоплению, обработке, систематизации, хранению, оперативному поиску и отображению в удобной форме различной информации. ЭВМ содержит в своей памяти информацию о различных методах решения конструкторских задач, справочные и оперативные данные, промежуточные и окончательные результаты этапов проектирования. Вся информация, хранящаяся в ЭВМ на машинных носителях информации, составляет банк данных САПР. В процессе эксплуатации САПР ее банк данных постоянно пополняется информацией.

Кроме ЭВМ в техническое обеспечение САПР входит оборудование, состоящее из алфавитно-цифровых и графических дисплеев, автоматического рабочего места радиоинженера (АРМ-Р), графопостроителей и печатающих устройств, перфораторов, автоматических координатографов и фотокоординатографов, автоматов с ЧПУ, сверлильных автоматов и т. д. Техническое обеспечение САПР показано на рис. 8.1. Дисплей используется для осуществления режима диалога конструктора с ЭВМ. АРМ-Р обеспечивает режим взаимодействия конструктора с ЭВМ (интерактивный режим) и выпуск конструкторской документации. Графопостроители и печатающие устройства используются для получения выходной графической и текстовой документации. Для перевода информации на перфоленды и перфокарты используются перфораторы. Информация, выполненная на перфокартах или перфолентах, должна использоваться для управления производственным оборудованием и технологиче-



скими процессами с целью автоматизированного изготовления узлов РЭА. Состав производственного оборудования определяется категорией проектируемых узлов. Это могут быть установки для автоматического сверления отверстий и перфорации окон в слоях многослойной печатной платы, станки с числовым программным управлением (ЧПУ), устройства для автоматического контроля изготовленного узла и т. д. Состав технического обеспечения САПР будет определяться возложенными на конкретную систему задачами.

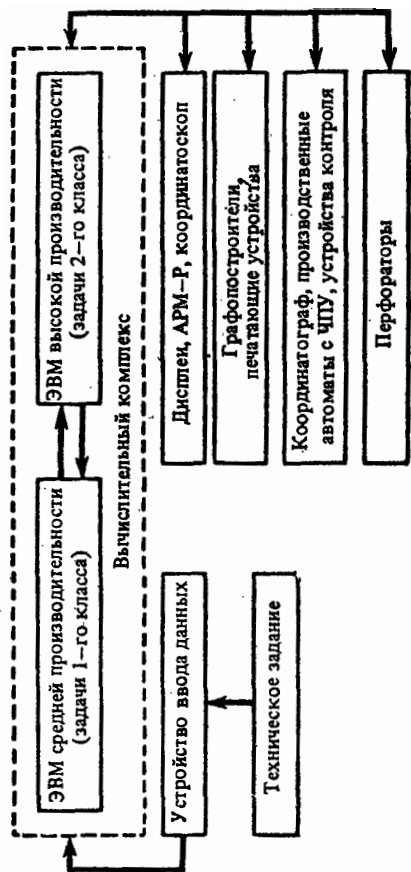


Рис. 8.1. Техническое обеспечение САПР

Для того чтобы технические средства выполняли возложенные на них конкретные задачи конструирования, для САПР необходимо иметь программное обеспечение, представляющее собой совокупность математических методов и моделей, а также алгоритмов, необходимых для осуществления процесса автоматизированного проектирования.

Применение определенных математических методов и моделей зависит от желаемой точности результатов. Для получения высокой точности приходится использовать более сложные модели и затрачивать большое количество времени, поэтому в ряде случаев отказываются от точных моделей реальных устройств и используют упрощенные модели.

Сложную задачу при создании САПР представляет разработка алгоритмов проектирования. Понятие алго-

ритма является одним из основополагающих понятий в теории и практике автоматизированного проектирования.

Для решения сложных задач автоматизированного проектирования используются известные алгоритмы и разрабатываются новые. В зависимости от конкретной задачи проектирования и необходимости учета заданной системы ограничений используются определенные алгоритмы. При решении сложных задач ее разбивают на части и составляют алгоритмы на отдельные задачи, а затем из отдельных решений получают решение всей задачи. Алгоритмы имеют различную сложность вычислительной схемы, поэтому использование тех или иных алгоритмов связано с техническим обеспечением САПР.

Использование ЭВМ средней производительности обуславливает применение в системе алгоритмов с наиболее простой вычислительной схемой, а использование быстродействующих ЭВМ высокой производительности применение более сложных алгоритмов, требующих больших вычислений.

Реализация алгоритма заключается в выполнении последовательности операций, задаваемых структурной схемой. Алгоритмы реализуются в виде машинных программ, а для осуществления процесса автоматизированного проектирования необходим набор программ, содержащий несколько десятков тысяч машинных команд и составляющий программное обеспечение САПР.

Программное обеспечение — сложная и трудоемкая задача. Каждая конкретная задача, решаемая в САПР, требует создания своего конкретного программного обеспечения. Но даже для каждой отдельной задачи нельзя создать универсальную программу, так как программы тесно связаны с конструкцией проектируемых устройств и технологическими ограничениями, которые часто меняются. Например, при автоматизированном проектировании печатных плат требуется удовлетворить таким требованиям: минимальная ширина печатного проводника и минимальный зазор между проводниками должны быть строго выдержаны; необходимо соблюдать минимальные размеры контактных площадок под переходные отверстия, минимальные зазоры между ними, а также минимальные зазоры между проводниками и площадками. Эти требования периодически изменяются, так как совершенствуются технологические процессы, технологическое оборудование, разрабатываются новые материалы, что дает возможность делать проводники более

тоякими, уменьшать зазоры между проводниками и т. д. Улучшение характеристик печатного монтажа приводит к повышению плотности монтажа и требует переработки программ.

### § 8.3. Построение систем технического проектирования РЭА

В системах автоматизированного проектирования РЭА решается обширный класс задач, но несмотря на многообразие конструкций и конструктивных решений, можно выделить четыре основные задачи: компоновка узлов, где производится распределение элементов схемы по конструктивно-функциональным узлам различного уровня сложности; размещение узлов низшего структурного уровня в узлах высшего структурного уровня; трассировка межсоединений на всех уровнях; получение конструкторско-технологической документации.

Эти задачи в содержательном плане аналогичны для узлов различного уровня сложности и различной технологической природы.

При решении задачи компоновки узлов определяется состав каждого конструктивного узла, а также схемы внутриузловых и междуузловых соединений. Примером задачи этого типа может быть разбиение схемы на БИС частного применения, компоновка простейших функциональных элементов логических схем типа И, ИЛИ, НЕ в корпусах цифровых ИМС средней степени интеграции и т. п. При решении задач компоновки необходимо учитывать большое количество таких ограничений, как количество элементов в узлах, суммарная площадь, которую занимают элементы и соединения, обеспечение электромагнитной совместимости отдельных элементов в узле и нормального режима теплообмена. Основными критериями при решении задачи компоновки: минимальное количество образующихся узлов, минимальное количество междуузловых соединений или минимальное количество внешних выводов на узлах.

Решения задач размещения и трассировки взаимосвязаны. В общем случае задачу размещения можно сформулировать следующим образом: задано определенное количество конструктивных элементов и связи между ними, задана совокупность ограничений на взаимное расположение элементов в пространстве; требуется разместить элементы на некотором монтажном пространстве та-

ким образом, чтобы система ограничений была выполнена наилучшим образом. Примером такой задачи является размещение бескорпусных ИМС на монтажном поле подложки гибридной ИМС, размещение корпусированных ИМС на монтажном поле печатной платы. Основными ограничениями при решении задачи размещения являются минимально допустимые расстояния между отдельными элементами, равномерность распределения элементов по поверхности и др.

В задачу трассировки входит проведение трасс, соединяющих заданные элементы; при этом связи между элементами определяются электрической принципиальной схемой. Практически соединения могут быть реализованы проводным, печатным и пленочным монтажом. При решении задачи трассировки действуют следующие основные ограничения: минимальная ширина проводников, минимальное расстояние между проводниками, форма и размеры монтажного пространства, размещение внешних контактов.

При решении задачи размещения, естественно, стремятся удовлетворить принятым ограничениям. Однако стремление расположить рядом элементы, количество связей между которыми максимально, приводит к неравномерности размещения элементов на монтажном поле, а равномерное расположение элементов на поверхности может способствовать удлинению связей между ними. Следовательно, задачи размещения оказываются тесно связанными с задачами трассировки. При этом качество размещения элементов сильно влияет, а иногда и полностью определяет качество трассировки. Взаимное влияние этих задач друг на друга говорит об их принципиальной неразделимости.

Совместное решение задач размещения и трассировки представляет значительные трудности, так как чрезвычайно сложный характер взаимосвязи между параметрами конструкции и схемами соединений не позволяет разработать алгоритмы, с помощью которых эти задачи решались бы совместно. Только человек обладает образным мышлением, которое помогает ему интуитивно решать одновременно задачи размещения и трассировки.

В САПР сначала решается задача размещения, а затем задача трассировки. Последовательное решение этих задач с учетом сложности их совместного решения оправдано в конструкциях с высокой степенью унификации размеров элементов и соединений. Примерами таких кон-

струкций являются узлы, состоящие из микросхем, соединенных с помощью двусторонних или многослойных печатных плат, многокристальные и монокристалльные БИС, имеющие несколько слоев коммутации, и т. д. Для таких конструкций, как правило, удается выделить главный критерий при оптимизации размещения, учитывая остальные параметры в виде набора дополнительных ограничений. Таким критерием в большинстве случаев является критерий минимума суммарной длины соединений, который в определенной степени учитывает многочисленные требования, предъявляемые к расположению элементов и трасс их соединений. Это обуславливается следующими основными факторами: уменьшение длины соединений улучшает электрические параметры схемы (как показывает практический опыт, чем меньше суммарная длина соединений, тем в среднем проще их реализация в процессе трассировки); уменьшение суммарной длины соединений снижает трудоемкость изготовления монтажных схем.

В большинстве случаев задача трассировки является решающей. Неудовлетворительное решение этой задачи вызывает необходимость повторного решения задачи размещения. Поэтому основной целью задачи размещения следует считать не столько соблюдение множества ограничений, сколько создание наилучших условий для последующей трассировки соединений при удовлетворении основных требований, обеспечивающих работоспособность схем.

Для некоторых конструкций РЭА последовательное решение задач размещения и трассировки приводит к неудовлетворительным результатам. Характерными особенностями таких конструкций являются нерегулярность расположения элементов и соединений, их разнотипность и наличие одного слоя коммутации. К таким конструкциям относятся односторонние печатные платы с микросхемами и дискретными навесными элементами, биполярные ИМС с одним слоем коммутации. Основным критерием при разработке топологии таких схем является минимум числа пересечений соединений, а ограничением — площадь, занимаемая схемой. К автоматизации проектирования таких конструкций применяют другие методы решения.

В результате решения задач размещения и трассировки получается точное пространственное положение от-

дельных элементов конструктивного узла и геометрически определенный способ реализации всех соединений.

Задача получения конструкторско-технологической документации является логическим завершением всего процесса автоматизированного проектирования, так как отражает результаты конструирования и определяет возможность автоматизации изготовления и контроля. Пути и возможности решения этой задачи будут рассмотрены в § 8.4, 8.5. Следует обратить внимание на то, что решение каждой следующей задачи в значительной степени зависит от результатов решения предыдущих задач.

Для реализации рассмотренных основных задач САПР должна быть обеспечена необходимой входной информацией о проектируемом устройстве, иметь банк данных, обеспечить хранение и использование промежуточной информации. Для обеспечения достоверности результатов проектирования необходим контроль отдельных этапов проектирования.

В общем виде структурная схема системы автоматизированного проектирования показана на рис. 8.2.

На вход САПР подается информация, необходимая для конструкторского синтеза разрабатываемого устройства: описание исходных данных о схеме устройства, описание конструктивных указаний для ориентации системы на определенную конструкцию. В описание конструкции входит описание конструкции монтажного поля (основания для печатной платы, подложки для микросхем или микросборки и т. д.) и конструкций элементов, размещаемых на монтажном поле. На основе этих описаний формируется библиотека описаний конструкций. На вход САПР подается также информация, необходимая для выпуска комплекта документации.

При автоматизированном проектировании важной операцией является контроль проектирования. При машинном проектировании информация проходит через три этапа: подготовка исходной информации — вычисления — вывод результатов. Целесообразно контролировать каждый из этих этапов. Наибольшее количество ошибок может быть при подготовке исходных данных, так как именно на этом этапе в ходе проектирования участвует человек. Основными источниками ошибок во входной информации являются ошибки в схемах, кодировании схем, ошибки перфорации, ошибки устройств ввода в ЭВМ.

Для уменьшения количества ошибок при кодирова-

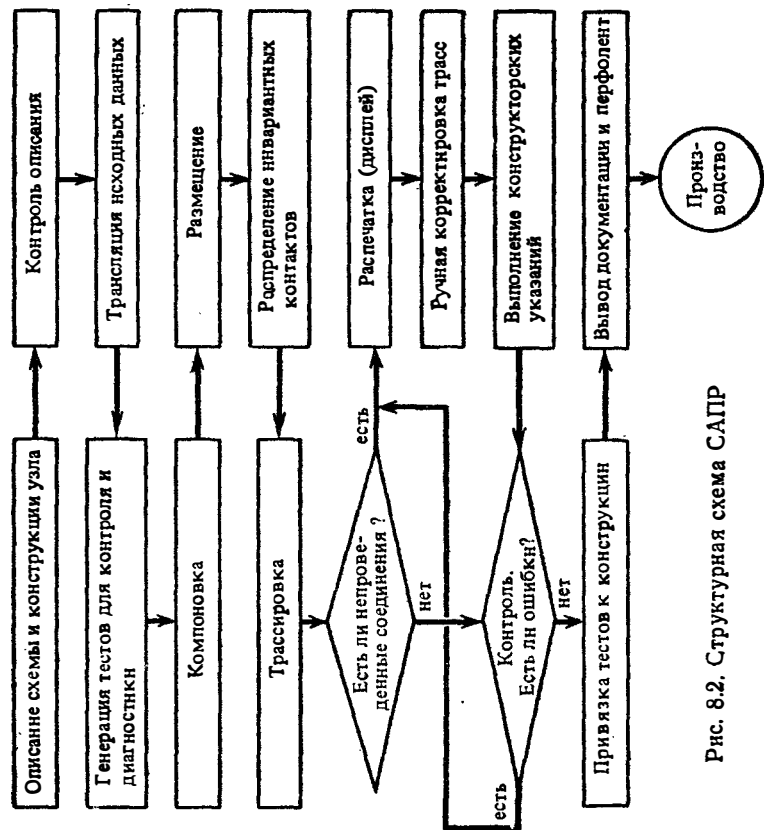


Рис. 8.2. Структурная схема САПР

нии целесообразно производить кодирование исходных данных двумя кодировщиками независимо друг от друга. При этом вероятность повторения одинаковой ошибки у обоих кодировщиков ничтожно мала, и сопоставляя результаты их кодирования, удается найти практически все ошибки кодирования. Сопоставление результатов кодирования лучше проводить с помощью ЭВМ, так как это очень кропотливая и трудоемкая работа. Очень важно, чтобы окончательное решение о правильности исходных данных принималось без участия человека.

Проверенные исходные данные транслируются в системные массивы САПР. В трансляторе с помощью специальных программ еще раз производится проверка исходных данных.

Изготовленный узел необходимо проконтролировать. Контроль проводится подсоединением контролирующих устройств к внешним выводам схемы. Следовательно, для контроля и диагностики необходимо произвести генерацию специальных тестов. При генерации тестов решается задача определения свободных выводов, к которым можно подсоединить контроль. Может возникнуть необходимость введения в схему дополнительных связей или исключения избыточных связей, что повлечет за собой изменение схемы, поэтому задача генерации тестов должна решаться до решения задач компоновки, размещения и трассировки.

Затем производится последовательное решение задач компоновки и размещения.

Перед решением задачи трассировки производится распределение инвариантных (логически равнозначных) контактов различных конструктивных единиц. Распределение инвариантных контактов следует рассматривать как средство для дополнительного улучшения возможностей последующей трассировки соединений.

И все же следующая задача — задача трассировки — является одной из сложнейших в процессе технического проектирования и не во всех случаях удается осуществить в САПР трассировку всех соединений. Поэтому может применяться автоматическая корректировка, во время которой изменяется рисунок проведенных трасс для проведения не построенных соединений, или производится ручная доработка трассировки. С этой целью в САПР производится анализ, есть ли не проведенные соединения, и при наличии таких соединений списки не проведенных соединений и рисунки трасс выводятся на печатающие

устройства или дисплея. Конструктор подготавливает указания об изменении трасс. Подготовленные конструкторские указания вводятся в ЭВМ и программа корректуры вносит изменения в рисунок трасс. При этом могут возникнуть дополнительные трудности, так как при добавлении непроведенного соединения трассы уже проведенных соединений приходится передвигать.

При ручной доработке возможны ошибки, поэтому необходимо провести контроль доработки. Если проводится алгоритмическая дотрассировка, то контроль также надо проводить, так как решение задачи трассировки занимает большое количество машинного времени и может произойти сбой ЭВМ. Контроль топологии включает в себя контроль технологических ограничений, проверку разработанного варианта топологии на соответствие принципиальной схеме и анализ электрических характеристик устройства по разработанной топологии. Эффективность программы контроля имеет большое значение, так как программа используется неоднократно. Если ошибок нет, то основные задачи технического проектирования оказываются выполненными.

Теперь для контроля можно использовать ранее разработанные тесты. Выводятся таблицы тестов, каталоги для диагностики неисправностей, перфоленты для управления контрольной и диагностической аппаратурой. Производится вывод конструкторской документации и всех данных, необходимых для работы технологических автоматов. Данные для управления этими автоматами выводятся на перфноситель.

После окончания процесса автоматизированного проектирования в памяти ЭВМ имеется вся информация, необходимая для вывода документации. В программах вывода документации в виде определенных констант хранятся сведения о форме, обозначениях, наименованиях документов.

Сложность выполнения отдельных этапов автоматизированного проектирования зависит от конструктивно-технологической реализации проектируемого устройства, но наиболее трудной задачей в общей проблеме автоматизации проектирования радиоэлектронных устройств остается задача трассировки соединений. Это связано с тем, что алгоритмы трассировки существенно отличаются для различных технологических способов выполнения монтажа (проводной монтаж, печатный монтаж, пленочный монтаж), а каждый способ обуславливает использова-

ние специфических критериев оптимизации и ограничений.

Для решения задач трассировки используется, как правило, несколько алгоритмов. Широко используется для решения сложных задач трассировки алгоритм, получивший название «волнового» алгоритма или волнового алгоритма Ли (по имени автора, впервые реализовавшего этот алгоритм). Этот алгоритм позволяет отыскивать кратчайший путь между двумя заданными точками в дискретном пространстве и строит этот путь при минимальном количестве пересечений других путей. На основе волнового алгоритма разрабатываются многие другие алгоритмы, позволяющие решать разнообразные задачи трассировки. При разработке систем автоматизированного проектирования самым важным и сложным вопросом остается разработка алгоритмических блоков.

В нашей стране работы по автоматизации проектирования изделий РЭА развернулись в середине 60-х годов. Разработка систем автоматизированного проектирования пошла по нескольким направлениям, которые выделились в связи с использованием в изделиях РЭА различной конструктивно-технологической базы. К настоящему времени разработано большое количество различных систем автоматизированного проектирования. Согласно ГОСТ 23501.8—80 можно выделить основные направления классификации САПР. По типам объектов проектирования различают САПР: изделий машиностроения и приборостроения; технологических процессов в машиностроении и приборостроении; объектов строительства; организационных систем.

По сложности объектов проектирования различают САПР: простых объектов, проектирующих объекты до  $10^2$  составных частей; объектов средней сложности, проектирующих объекты свыше  $10^2$  до  $10^3$  составных частей; сложных объектов — свыше  $10^3$  до  $10^4$  составных частей; очень сложных объектов — свыше  $10^4$  до  $10^6$  составных частей; объектов очень высокой сложности — свыше  $10^6$  составных частей.

По уровню автоматизации проектирования различают САПР: простых объектов, проектирующих объекты до 25% общего количества автоматизированных процедур составляет до 25% общего количества проектных процедур; среднеавтоматизированного проектирования, в которых количество автоматизированных процедур составляет свыше 25 до 50% общего количества проектных проце-

дур; высокоавтоматизированного проектирования, в которых количество автоматизированных процедур составляет свыше 50% общего количества проектных процедур.

По характеру выпускаемых документов различают САПР: текстовых документов; текстовых и графических документов; документов на машинных носителях (перфокартах, перфолентах, магнитных лентах, дисках, барабанах); документов на фотоносителях; документов на двух видах носителей данных; документов на всех типах носителей данных.

Одним из направлений являются системы автоматизированного проектирования печатных плат. Системы проектируют узлы РЭА на односторонних, двусторонних и многослойных печатных платах. На печатных платах могут устанавливаться дискретные элементы (резисторы, конденсаторы и т. д.), бескорпусные ИМС и ИМС в стандартных корпусах с планарными и штырьковыми выводами.

Другим направлением является автоматизация проектирования микроэлектронных узлов, коммутация в которых реализуется на подложках, выполненных на основе пленочной технологии. Это толстопленочные и тонкопленочные микросборки, гибридные и пленочные ИМС. На подложках могут устанавливаться бескорпусные интегральные и дискретные компоненты (такие узлы, как правило, выпускаются в герметизированных корпусах). Примером может служить автоматизированная система монтажно-коммутационного проектирования микросборок. Система проводит размещение, трассировку, выпуск документации, изготовление фотошаблонов. На поле подложки размером  $64 \times 48 \text{ мм}^2$  может быть установлено до 512 элементов, число контактов может быть до 3000. Время разработки с помощью системы сокращается в 10—20 раз. Очень важным направлением является разработка полупроводниковых ИМС и БИС, так как специфика их разработки требует длительного срока изготовления опытного образца и имеет высокую стоимость. Машинные методы проектирования дают возможность значительно сократить сроки разработки и уменьшить стоимость. Именно благодаря машинному проектированию стало возможным создание БИС с высокой степенью интеграции. Примером таких систем является система программ автоматизации топологического проектирования микроэлектронных схем.

Система предназначена для разработки микроэлек-

тронных узлов, состоящих из кристаллов ИМС, типовых ячеек БИС, соединения между которыми реализуются в нескольких слоях на подложке гибридных ИМС или непосредственно на кристалле БИС. Система содержит большой комплекс программ, заключенных в десяти програмных модулях. Наличие набора программных модулей для решения задач компоновки, размещения и трассировки позволяет применять многие из них при разработке схем различного технологического выполнения: печатных плат, больших гибридных и монолитных интегральных схем. При переходе к проектированию с другой конструктивно-технологической базой изменяется последовательность использования программных модулей.

Эффективность использования любой системы автоматизированного проектирования в значительной степени зависит от организации работ по эксплуатации системы. Центральным звеном в организации работ является диспетчер, который ведет учет всех проектируемых схем, заполняет перечень документов конструктивных узлов, составляет график прохождения работ. Диспетчер готовит задания для каждой подсистемы автоматизированного проектирования: указываются данные, которые обрабатываются каждой подсистемой, подготавливается пакет всех заданий. Система программ для решения задач автоматизированного проектирования должна обеспечивать простоту ее использования. В эксплуатации системы не должны участвовать программисты, которые составляли программы. Необходимость присутствия программистов во время решения задач проектирования указывает на несовершенство системы программ.

Большое значение для эксплуатации систем автоматизированного проектирования имеет наличие нормативно-технической документации. Совокупность этих документов составляет методическое и организационное обеспечение автоматизированного проектирования. В комплект нормативно-технической документации входит, например, инструкция по подготовке исходных данных для САПР, инструкция для оператора САПР, инструкция по формированию программного обеспечения, инструкции по применению графопроекторов, координатографов и другого оборудования. Выпускаются стандарты предприятий или отраслевые стандарты на автоматизированное проектирование конкретных узлов. В стандартах указывается технологический метод изготовления узла, технологические ограничения, требования



к конструкции (допустимые размеры и форма плат или подложек, правила установки навесных элементов и правила формовки и распайки их выводов, размеры и размещение проводников и т. д.), требования к оформлению выпускаемой конструкторской документации. В стандарте указываются другие нормативно-технические документы, в соответствии с которыми ведется автоматизированное проектирование.

#### § 8.4. Конструкторская и технологическая документация при автоматизированном проектировании

Завершающий и ответственный этап технического проектирования — получение комплекта конструкторской и технологической документации, необходимой для автоматизированного изготовления и контроля проектируемого изделия. Конструкторская документация должна в общепринятой графической и текстовой форме отражать результаты автоматизированного проектирования, а технологическая должна обеспечивать автоматизацию процессов изготовления и контроля изделий.

Задача получения документации в САПР связана с целым рядом трудностей. Прежде всего выпускаемая конструкторская документация должна полностью удовлетворять требованиям соответствующих ГОСТ ЕСКД. В то же время действующий комплекс ГОСТ ЕСКД является в основном обобщением опыта традиционных ручных методов проектирования и, несмотря на внесенные в него изменения, не учитывает всех особенностей автоматизированного выпуска документации. Кроме того, ограниченными возможностями обладают существующие технические средства отображения графической и текстовой информации, которые не позволяют получать в готовом виде всю необходимую конструкторскую документацию. Это приводит к тому, что в обращении на предприятии, в производстве находятся документы, выполненные машинным способом и конструктором, что влечет за собой изменение функций и взаимоотношений между отдельными подразделениями.

При автоматизированном выпуске конструкторско-технологической документации необходимо выполнять основные требования: при выборе форм и форматов выходных документов необходимо учитывать стандарты ЕСКД; система автоматизированного проектирования должна по возможности выдавать весь комплект конст-

рукторско-технологических документов, который получается при неавтоматизированном проектировании, и дополнительно конструкторско-технологические документы для этапов контроля изготовленного изделия; машинные формы конструкторско-технологической документации должны обеспечивать не только автоматизированные, но и неавтоматизированные методы обращения документации и изготовления узлов; основные графические документы целесообразно выполнять базовым способом.

С точки зрения автоматизации формирования выпускаемой документацию можно классифицировать на три группы: документы, содержащие только буквенно-цифровую информацию (цифры, русские и латинские буквы, специальные символы); документы, содержащие наряду с буквенно-цифровой графической информацией в виде чертежей, схем и т. п.; технологические документы в виде перфолент для управления технологическим оборудованием изготовления и контроля. К первой группе относятся, например, «Ведомость покупных изделий», «Спецификация»; ко второй — «Сборочный чертеж», «Чертеж печатной платы»; к третьей — перфоленты управления координатографами, сверлильными автоматами и т. п.

Программы получения конструкторской документации в САПР позволяют получать электрические схемы, сборочные чертежи, спецификации, таблицы соединений, ведомости покупных изделий. Это наиболее типичный состав конструкторской документации для многих систем автоматизированного проектирования.

#### § 8.5. Технические средства получения конструкторской документации

Автоматизация выпуска текстовой и графической документации в САПР обеспечивается комплексом технических средств и программ. Программы должны обеспечивать перевод информации о текстовой и графической документации, сформированной в рабочем архиве САПР, на перфоленты, которые управляют техническими средствами выпуска документации.

Перфоленты с информацией о текстовых документах обеспечивают работу алфавитно-цифровых печатающих устройств, на которых могут выполняться кроме текстовых документов различные таблицы, математические расчеты, некоторые виды схемной документации. Все

текстовые документы (за исключением титульных листов документов) выпускаются в виде распечаток, в которых размеры всех граф, колонок соответствуют ГОСТу. Титульный лист автоматизированным способом выпускается частично заполненным, а та часть, которая изменяется (фамилии, подписи, число, год и т. д.), заполняется вручную.

Для получения чертежей автоматизированным способом комплекс программ преобразует информацию о чертежах в язык чертежных автоматов, зафиксированный в управляющей перфоленте. Основным техническим средством получения графической информации являются графопостроители (чертежные автоматы), обладающие довольно высокой скоростью вычерчивания графических документов (до 1000 мм/с). Промышленностью выпускаются графопостроители трех классов, отличающихся способом программного управления.

Техническим средством машинной графики являются также программно-управляемые координатографы, которые могут работать в трех режимах: 1) кодировщик графической информации — этот режим позволяет кодировать чертеж и получать перфоленту для его выполнения; 2) прорисовка уже закодированных чертежей — использование координатографа позволяет при работе в этом режиме по полученной один раз перфоленте воспроизводить закодированный чертеж необходимое количество раз; 3) изготовление фотошаблонов печатных плат.

Применяются также координатографы, которые используются только для получения фотошаблонов, причем отдельные типы таких координатографов позволяют изготавливать фотошаблоны в незатемненных помещениях.

Специальным техническим средством для кодирования графической информации являются кодировщики, которые переводят графическую информацию в цифровую и выдают результаты кодирования на перфоленту (или непосредственно в ЭВМ).

В настоящее время возможность полной автоматизации процесса технического проектирования представляет сложную проблему. Трудность решения проблемы связана с большой размерностью задачи, отсутствием непротиворечивых критериев оптимизации и ограниченными возможностями ЭВМ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенный в книге материал не исчерпывает все направления работы конструктора, принципы и методы конструирования РЭА, которые используются в настоящее время. Перед конструктором РЭА стоят проблемы дальнейшего развития методов конструирования, связанные в основном с необходимостью микроминиатюризации РЭА и с переводом значительной части аппаратуры на цифровые методы обработки информации. Наиболее эффективным средством решения проблемы комплексной микроминиатюризации будет функциональная микроэлектроника. Переход к цифровым методам обработки сигналов значительно увеличивает число электро-монтажных связей между различными электронными устройствами, что обуславливает дальнейшую микроминиатюризацию монтажа. Одним из путей решения этой задачи является использование волокоино-оптических линий связи.

Перед конструктором РЭА стоит также задача совершенствования теплоотводящих конструкций, что вызвано высокой плотностью упаковки микросхем и микросборок.

Работа по созданию РЭА становится невозможной без дальнейшего развития и совершенствовании автоматических методов конструирования.

Конструктор РЭА будущих поколений должен обладать знаниями в области вычислительной техники, программирования, теории алгоритмов, быть способным разрабатывать и эксплуатировать системы автоматизированного проектирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Белецкий В. В. Теория и практические методы резервирования радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Энергия, 1977.
2. Берхопятницкий П. Д., Латинский В. С. Справочник по модульному конструированию радиоэлектронной аппаратуры. — Л.: Судостроение, 1983.
3. Компонировка и конструкции микроэлектронной аппаратуры / Под ред. Б. Ф. Высоцкого, В. Б. Пестрякова, О. А. Пятлгина. — М.: Радио и связь, 1982.
4. Конструирование и расчет БГИС, микросборок и аппаратуры на их основе / Под ред. Б. В. Высоцкого. — М.: Радио и связь, 1981.
5. Морозов К. К., Одинокоев В. Г., Курейчик В. М. Автоматизированное проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Радио и связь, 1983.
6. Невашев А. П., Коледов Л. А. Основы конструирования микроэлектронной аппаратуры. — М.: Радио и связь, 1981.
7. Основы проектирования микроэлектронной аппаратуры / Под ред. Б. Ф. Высоцкого. — М.: Советское радио, 1978.
8. Сборник задач по теории надежности / Под ред. А. М. Половко, И. М. Маликова. — М.: Советское радио, 1972.
9. Романов Ф. И., Шахнов В. А. Конструкционные системы микроЭВМ. — М.: Радио и связь, 1983.
10. Справочник конструктора РЭА / Под ред. Р. Г. Варламова. — М.: Советское радио, 1980.



# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3	Глава 5. Конструирование РЭА третьего поколения . . . . .	70
Введение . . . . .	5	§ 5.1. Элементная база РЭА третьего поколения . . . . .	70
Глава 1. Факторы, определяющие конструкцию РЭА . . . . .	7	§ 5.2. Печатные платы, гибкие шлейфы и кабели . . . . .	78
§ 1.1. Классификация и области применения РЭА . . . . .	7	§ 5.3. Компоновка РЭА третьего поколения . . . . .	93
§ 1.2. Условия эксплуатации РЭА . . . . .	12	§ 5.4. Компоновочные схемы РЭА . . . . .	105
§ 1.3. Ремонтпригодность и взаимозаменяемость при эксплуатации РЭА . . . . .	18	§ 5.5. Внешняя компоновка РЭА . . . . .	111
Глава 2. Конструкторская документация . . . . .	23	Глава 6. Конструирование РЭА четвертого поколения . . . . .	114
§ 2.1. Конструкторские документы и их классификация . . . . .	23	§ 6.1. Основные направления микроминиатюризации и задачи микроэлектроники . . . . .	114
§ 2.2. Стадии разработки конструкторской документации . . . . .	27	§ 6.2. Элементная база РЭА четвертого поколения . . . . .	116
§ 2.3. Организация работы с конструкторской документацией на предприятии . . . . .	30	§ 6.3. Компоновка РЭА четвертого поколения . . . . .	133
Глава 3. Проектирование РЭА с учетом требований надежности . . . . .	34	Глава 7. Тенденции развития микроэлектроники . . . . .	143
§ 3.1. Основные определения теории надежности . . . . .	34	§ 7.1. ИМС большой и сверхбольшой степени интеграции . . . . .	143
§ 3.2. Количественные характеристики теории надежности . . . . .	37	§ 7.2. Основные направления развития функциональной микроэлектроники . . . . .	147
§ 3.3. Расчеты надежности при проектировании РЭА . . . . .	42	Глава 8. Использование машинного проектирования при конструировании изделий РЭА . . . . .	154
§ 3.4. Общие и специальные методы повышения надежности . . . . .	46	§ 8.1. Общие вопросы автоматизации проектирования РЭА . . . . .	154
§ 3.5. Особенности обеспечения надежности микроэлектронной аппаратуры . . . . .	56	§ 8.2. Техническое и программное обеспечение систем автоматизированного проектирования . . . . .	157
Глава 4. Компоновка РЭА . . . . .	58	§ 8.3. Построение систем технического проектирования РЭА . . . . .	162
§ 4.1. Основные принципы компоновки . . . . .	58	§ 8.4. Конструкторская и технологическая документация при автоматизированном проектировании . . . . .	172
§ 4.2. Внутренняя компоновка изделий . . . . .	59	§ 8.5. Технические средства получения конструкторской документации . . . . .	173
§ 4.3. Конструктивная иерархия и основные направления конструирования РЭА . . . . .	62	Заключение . . . . .	175
§ 4.4. Критерии качества компоновки и конструкции . . . . .	68	Литература . . . . .	175